

КОАКСИАЛЬНЫЙ РЕЗОНАТОР В КРУГЛОМ ЗАПРЕДЕЛЬНОМ ВОЛНОВОДЕ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ВЛИЯНИЯ МОДИФИКАЦИИ ПОВЕРХНОСТИ МЕДИ НА ЕЕ ПРОВОДИМОСТЬ¹

© 2024 г. З. Н. Нуриахметов^{a,*}, Ю. Д. Черноусов^a, Д. В. Смовж^b

^a *Институт химической кинетики и горения им. В.В. Воеводского*

*Сибирского отделения Российской академии наук
Россия, 630090, Новосибирск, ул. Институтская, 3*

^b *Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе
Сибирского отделения Российской академии наук
Россия, 630090, Новосибирск, пр. Ак. Лаврентьева, 1*

*e-mail: zaur.nuriakhmetov@gmail.com

Поступила в редакцию 28.11.2023 г.

После доработки 19.05.2024 г.

Принята к публикации 28.05.2024 г.

Представлен резонатор на запертой моде в запердельном волноводе. Резонатор содержит отрезок цилиндра, установленный в круглом волноводе соосно с его внутренней поверхностью. Электромагнитное поле локализовалось вблизи цилиндра, и на частоте 4 ГГц возбуждался резонанс на ТЕМ-моде колебаний. Граничная частота отсечки для низшей TE_{11} -моды в выбранном волноводе составляла около 7 ГГц, поэтому на более низких частотах электромагнитная волна не могла распространяться вдоль волновода, за счет чего реализовывался режим запертой ТЕМ-моды. Основные потери в таком устройстве сосредоточены в цилиндре, что позволяет путем измерения добротности резонатора изучить влияние модификации медной поверхности цилиндра на ее проводимость. В работе описана методика использования резонатора для указанной цели, приведены результаты исследования влияния отжига и покрытия графеном поверхности меди на ее свойства. Графен синтезировался на меди методом химического осаждения из газовой фазы.

Ключевые слова: ~~запердельный волновод, модификация поверхности, проводимость~~

¹ Материалы 28-й конференции по ускорителям заряженных частиц “RuPAC’23”, Новосибирск.

1. ВВЕДЕНИЕ

Модификация поверхности металла: легирование, покрытие тонкими пленками, термическая обработка – приводит к изменениям проводимости, устойчивости к окислению и других свойств используемых металлов и, следовательно, характеристик сверхвысокочастотных (СВЧ) устройств – волноводов, резонаторов. Такие воздействия могут быть направлены как на пассивацию поверхности (процесс, при котором на поверхности металла образуется защитная пленка, препятствующая дальнейшей коррозии и разрушению), что используется для увеличения коррозионной стойкости, так и на покрытие тонкой пленкой металла с более высокой проводимостью для уменьшения потерь в волноводах и повышения добротности резонаторов. В ускорительной технике также используются покрытия с низким коэффициентом вторичной эмиссии для противодействия развитию вторично-эмиссионного резонансного разряда (мультипактора).

В СВЧ-диапазоне толщина скин-слоя в металле составляет единицы и доли микрон, поэтому любая модификация поверхности вносит изменения в поверхностное сопротивление, тем самым меняя параметры устройств, изготовленных из такого металла. Так, рост оксидного слоя на поверхности меди приводит к уменьшению поверхностной проводимости и, следовательно, добротности изготовленных из нее резонаторов [1, 2].

Для измерений разработан коаксиальный резонатор на запертой ТЕМ-моды в запердном волноводе. Устройство выполнено в виде круглого волновода, в котором соосно с его внутренней поверхностью установлен отрезок цилиндра. Запертая мода характеризуется возникновением такой резонансной моды колебаний, при которой электромагнитное поле не может распространяться во всём устройстве в целом, ограничиваясь некоторой областью устройства. В нашем случае режим запертой ТЕМ-моды реализовывался за счёт того, что электромагнитное поле локализовалось вблизи цилиндра и на частоте 4 ГГц возбуждался резонанс на ТЕМ-моды колебаний. Граничная частота отсечки для низшей TE_{11} -моды в выбранном волноводе составляла около 7 ГГц, поэтому на более низких частотах электромагнитная волна не могла распространяться вдоль волновода. В данной работе приведены электродинамические характеристики такого резонатора, описано распределение электромагнитного поля и токов в стенках. Изложена методика использования описанного устройства для изучения влияния модификации поверхности на параметры металлов, приведены результаты исследования влияния покрытия графеном на свойства поверхности меди. Графен синтезировался на меди методом химического осаждения из газовой фазы (ХОГФ).

2. ОПИСАНИЕ РЕЗОНАТОРА

При исследовании проводимости металлов с помощью объемного резонатора обычно возникает источник дополнительных потерь – электрический контакт в местах соединения деталей устройства. Если такое соединение находится в месте протекания СВЧ-токов, то величина потерь может быть значительной. Для борьбы с этими потерями необходимо контролировать качество изготовления устройства, использовать по возможности не механическое соединение, а пайку или сварку. Однако полностью избежать потерь в электрических контактах не удастся. Поэтому при разработке устройства для исследования поверхностной проводимости мы руководствовались необходимостью максимального сокращения электромеханических соединений. Так, в используемом резонаторе образец, поверхность которого подвергается модификации, не имеет электромеханических соединений с внешним корпусом, а основные потери сконцентрированы в нем самом, что позволяет исследовать влияние модификации поверхности на электродинамические характеристики металла.

В работе применен резонатор коаксиального типа на запертой моде колебаний, расположенный в круглом запердельном волноводе, содержащий отрезок медной цилиндрической трубы и установленный в нем резонансный элемент – медный цилиндр (рис. 1). Цилиндр фиксировался в трубе с помощью диэлектрического кольца. Для измерений с помощью коаксиальных электрических зондов, расположенных по оси устройства, в резонаторе возбуждался резонанс ТЕМ-типа с продольными СВЧ-токами в трубе и цилиндре. Размер зондов выбирался таким, чтобы коэффициент связи резонатора по входу и выходу был много меньше единицы.

Рис. 1. Устройство резонатора: **a** – элементы ввода СВЧ-сигнала коаксиального типа; **b** – внешний цилиндр резонатора; **c** – внутренний проводящий цилиндр, поверхность которого подвергается модификации; **d** – опорное фторопластовое (PTFE) кольцо.

Длина отрезка медной трубы составляла 100 мм, внутренний диаметр 26 мм, медный цилиндр имел длину 28 мм и диаметр 10 мм. Сквозное отверстие с резьбой М3 по оси цилиндра предназначено для установки образца в печь для проведения технологических операций модификации поверхности. В центре трубы (см. рис. 1) установлено фторопластовое кольцо

(фторопласт-4 PTFE) с внутренним диаметром 10 мм для фиксации медного цилиндра в резонаторе. Резонансная частота определялась в основном длиной цилиндра и при выбранных размерах составляла около 4 ГГц на ТЕМ-моде.

Возбуждение резонанса на ТЕМ-моды в коаксиальном резонаторе осуществляется следующим образом. В круглом волноводе (см. рис. 1а) с помощью электрических зондов возбуждается мода TM_{01} с продольной компонентой электрического поля. Соответствующая этой моде частота отсечки для выбранного диаметра волновода составляет около 9 ГГц, что делает невозможным ее распространение вдоль волновода. В коаксиальном резонаторе за счет продольной компоненты электрического поля зонда возбуждается ТЕМ-мода колебаний, и возникает резонанс, частота которого определяется в основном длиной внутреннего цилиндра.

Низшей (по частоте) модой, распространяющейся в волноводе, является мода TE_{11} . При выбранном диаметре волноводной трубы 26 мм частота отсечки этой моды составляет около 7 ГГц, поэтому и для этой моды на частоте резонанса (4 ГГц) волновод является запертым. ТЕМ-мода в круглом волноводе также не распространяется. Таким образом, за счет выбранной геометрии и метода возбуждения электромагнитных колебаний в устройстве в целом возбуждался резонанс на “запертой” ТЕМ-моды в круглом запертом волноводе. Амплитудно-частотная характеристика устройства в широкой полосе частот представлена на рис. 2. Измерение проводилось с помощью анализатора цепей Agilent N5230A.

Рис. 2. Амплитудно-частотная характеристика устройства в широкой полосе частот. На рисунке отмечена низшая мода устройства, которая находится ниже частоты отсечки устройства (низшей моды TE_{11}) в целом.

Для визуализации детальной структуры поля моды (см. рис. 2) и расчета электродинамических параметров устройства использовалась программа CST Microwave Studio. Результаты расчетов приведены на рис. 3, 4. На частоте около 4 ГГц в резонаторе возбуждалась ТЕМ-мода колебаний. На рис. 3 представлена картина полей этой моды в поперечном сечении резонатора. Как видно на рисунке, напряженность электрического поля в центре устройства мала, поскольку в этом месте происходит смена направления вектора электрического поля. Поэтому установка слабо поглощающего диэлектрического кольца точно по середине цилиндра не добавляет значительных потерь. Оно служит для установки проводящего цилиндра в устройство.

Рис. 3. Расчетное распределение напряженности электрического поля.

Рис. 4. Распределение абсолютных значений поверхностных токов.

Сумма токов через поперечное сечение резонатора должна равняться нулю, поэтому отношение амплитудных значений токов во внешней трубе и внутреннем цилиндре и, соответственно, соотношение потерь определяются отношением диаметров внешней и внутренней жил. Согласно расчетам, при выбранных размерах плотность поверхностных токов во внутреннем цилиндре будет в 2.6 раза больше, чем во внешних стенках резонатора. На рис. 4 представлена картина распределения поверхностных токов. При таком распределении основной вклад в потери в стенках устройства вносят потери в центральном медном цилиндре.

Поскольку внутренний проводник установлен в диэлектрике и устройство в целом не имеет металлических соединений, потери, приходящиеся на места недостаточно плотных контактов, отсутствуют. Такой дизайн позволяет легко заменять внутренний цилиндр с различными модификациями поверхности и избегать ошибок, связанных с неконтролируемыми потерями в металлических соединениях.

Особенности устройства, описанные выше, дают возможность использовать его для исследования влияния модификации поверхности меди на ее поверхностную проводимость. Методика измерений заключается в следующем. Поверхность внутреннего медного цилиндра подвергается модификации, в данной работе, например, покрытию одним слоем графена по методике ХОГФ (CVD) [3]. После этого образец устанавливается в резонатор, с помощью анализатора цепей по амплитудно-частотной характеристике измеряется нагруженная добротность такого резонатора. Пример амплитудно-частотной характеристики и измерений нагруженной добротности приведен на рис. 5. Для определения проводимости стенок устройства необходимо знать собственную добротность резонатора, которая определяется только потерями в стенках. Нагруженная добротность, кроме потерь в стенках, определяется также коэффициентами связи резонатора и зависит от собственной добротности в соответствии со следующим соотношением: $Q_n = Q_0 / (1 + \beta_1 + \beta_2)$, где Q_n – нагруженная добротность, Q_0 – собственная добротность, β_i – коэффициенты связи устройства. Коэффициенты связи выбирались из условия $\beta_i \ll 1$, поэтому величины нагруженной и собственной добротности практически совпадали. Используемый дизайн позволял с высокой точностью исследовать влияние

модификации поверхности на собственную добротность устройства, и, следовательно, сопоставлять проводимость поверхности меди до и после модификации. Добротность резонатора Q зависит от проводимости σ материала, из которого он изготовлен: $Q \propto \sqrt{\sigma}$ [4]. При изменении проводимости всех элементов резонатора величина добротности изменяется в соответствии с соотношением

$$\frac{\Delta Q}{Q} = \frac{\Delta \sigma}{2\sigma}.$$

В нашем случае обработке подвергался только внутренний медный цилиндр, который изменяет свою проводимость, поэтому наблюдаемое изменение добротности несколько меньше. После отжига в атмосфере водорода добротность резонатора увеличивается примерно на 3.5%, что связано с ростом проводимости меди после модификации поверхности. Увеличение же проводимости меди связано с ростом кристаллов одной ориентации и удалением примесей. Покрытие графеном, в свою очередь, не вносит значительных изменений в проводимость, но тем не менее пассивирует поверхность меди, увеличивая ее стойкость к окислению и осаждению примесей из атмосферы. Такая пассивация позволяет сохранить проводимость меди после отжига в течение длительного времени. Более детальное исследование влияния графена на электродинамические характеристики резонатора представлено в работе [3].

Рис. 5. Пример амплитудно-частотной характеристики описанного устройства для измерения нагруженной добротности. f_0 – резонансная частота, Q_n – нагруженная добротность.

3. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе представлен резонатор коаксиального типа на запертой моде в круглом запердном волноводе, содержащий отрезок медной цилиндрической трубы и коаксиально установленный в ней резонансный элемент – проводящий цилиндр. Такой резонатор можно использовать для исследования влияния модификации поверхности на электродинамические характеристики резонатора и на параметры материала центрального проводника. Устройство имеет минимальное количество электромеханических соединений, которые способствуют появлению дополнительных неконтролируемых потерь и вносят ошибки в измерения. Основные потери сосредоточены в центральном проводнике – медном цилиндре. Методика заключается в следующем: поверхность центрального проводника подвергается модификации, затем сопоставляются значения добротности резонатора до и после указанной процедуры, и

оцениваются величины изменения проводимости поверхности. Погрешности метода определяются точностями измерения добротности и позиционирования центрального проводника в резонаторе.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Park JH, Park JG* // SN Applied Sciences. 2020. V. 2. Iss. 5.
<https://doi.org/10.1007/s42452-020-2819-8>
2. *Zhuze V. P., Kurchatov B.V.* // Physik. Z. Sowjetunion. 1932. V. 2. P. 453.
3. *Nuriakhmetov Z., Chernousov Y., Sakhapov S., Smovzh D.* // *Nanotechnology*. 2023. V. 34. №20.
<https://doi.org/10.1088/1361-6528/acbb7d>
4. *Pozar D. M.* Microwave Engineering. New York: Wiley, 2004.

ПОДПИСИ К РИСУНКАМ

Рис. 1. Устройство резонатора: **a** – элементы ввода СВЧ сигнала коаксиального типа; **b** – внешний цилиндр резонатора; **c** – внутренний проводящий цилиндр, поверхность которого подвергается модификации; **d** – опорное фторопластовое (PTFE) кольцо.

Рис. 2. Амплитудно-частотная характеристика устройства в широкой полосе частот. На рисунке отмечена низшая мода устройства, которая находится ниже частоты отсечки устройства (низшей моды TE_{11}) в целом.

Рис. 3. Расчетное распределение напряженности электрического поля.

Рис. 4. Распределение абсолютных значений поверхностных токов.

Рис. 5. Пример амплитудно-частотной характеристики описанного устройства для измерения нагруженной добротности. f_0 – резонансная частота, Q_n – нагруженная добротность.

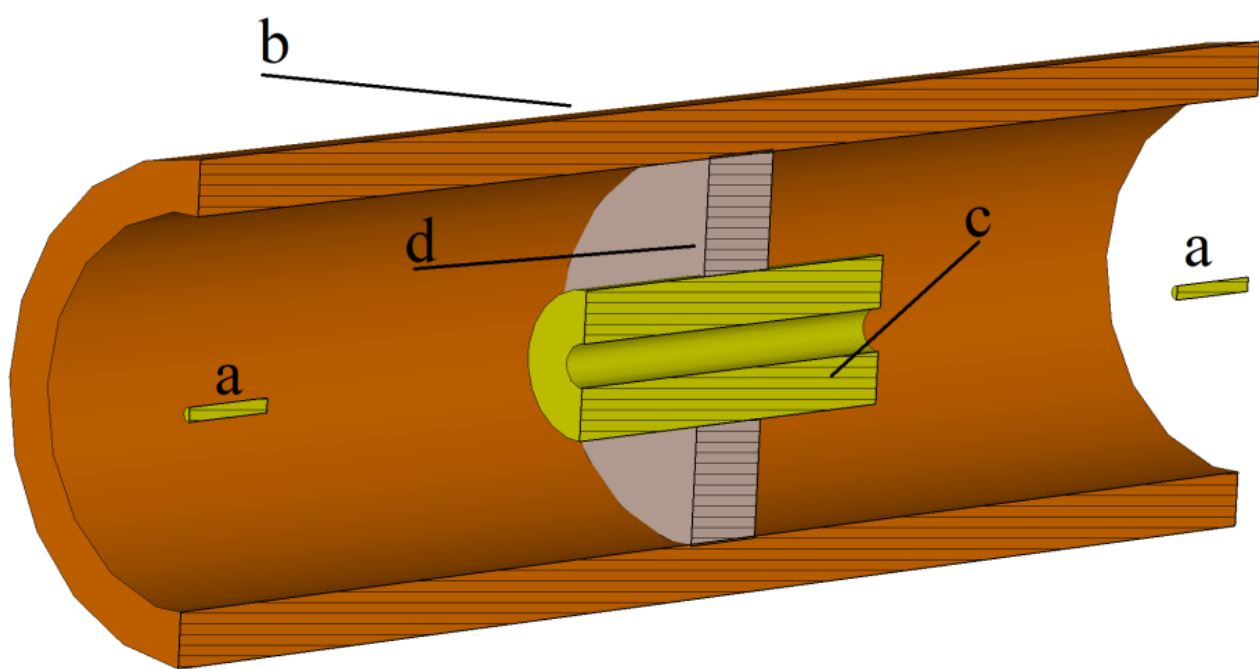


Рис. 1

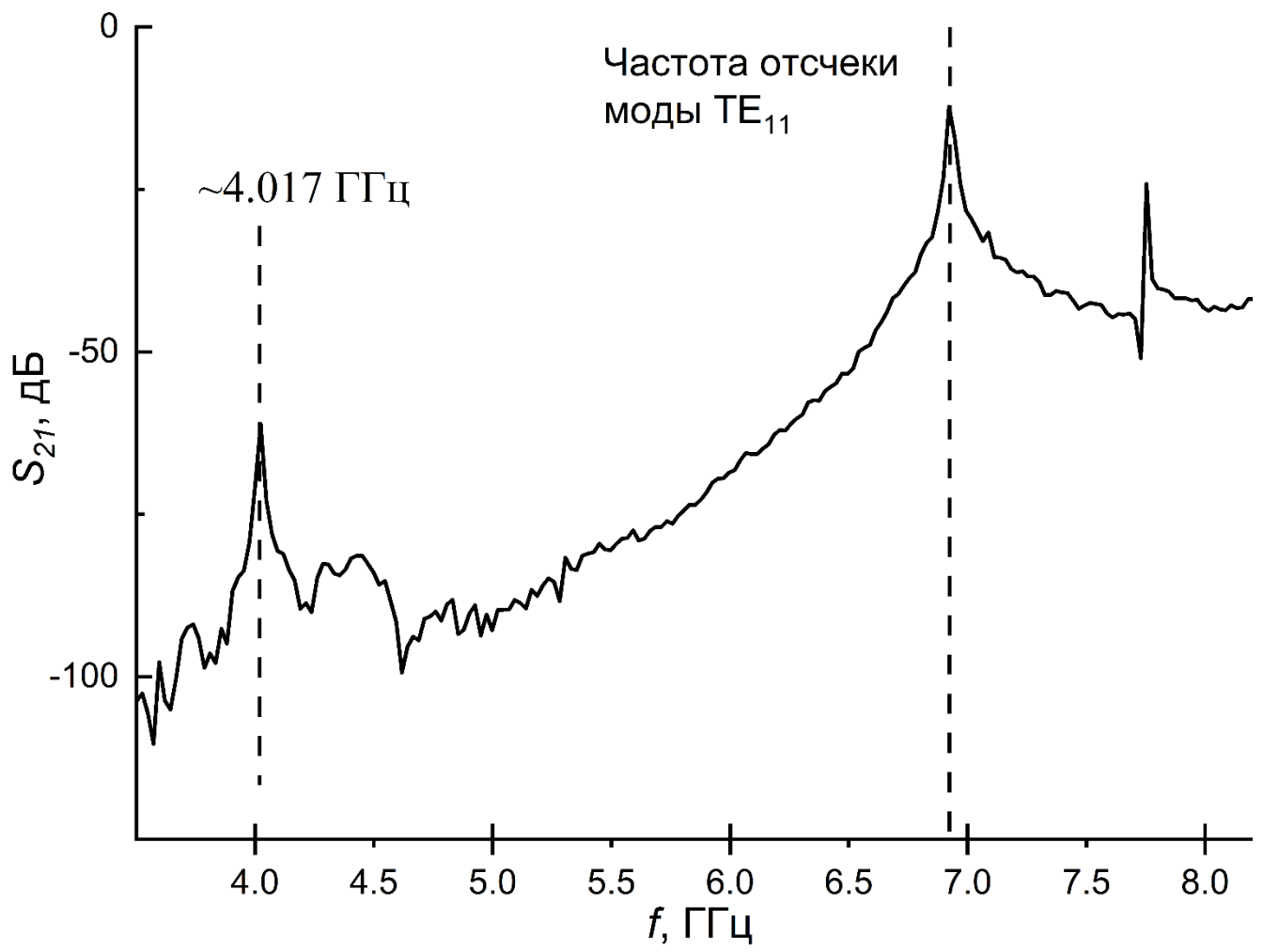


Рис. 2

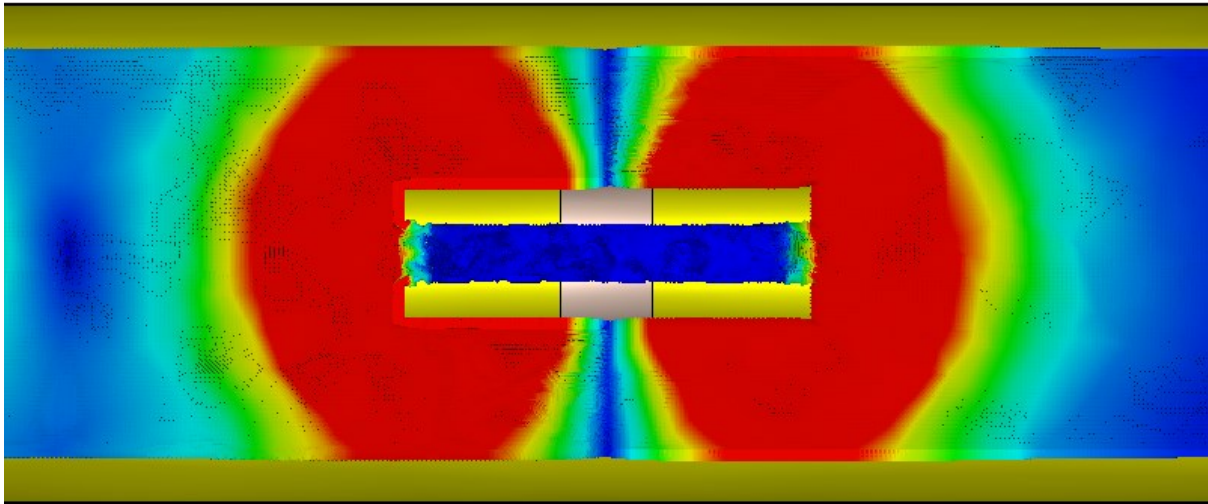


Рис. 3

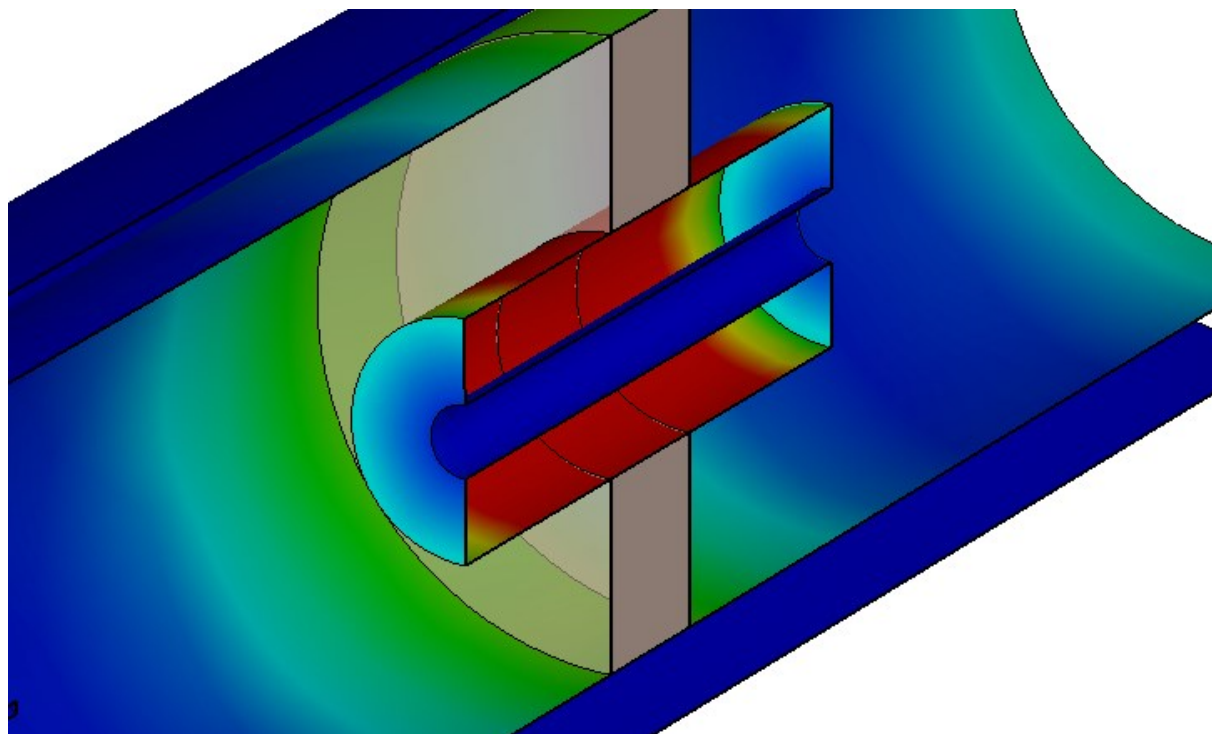


Рис. 4

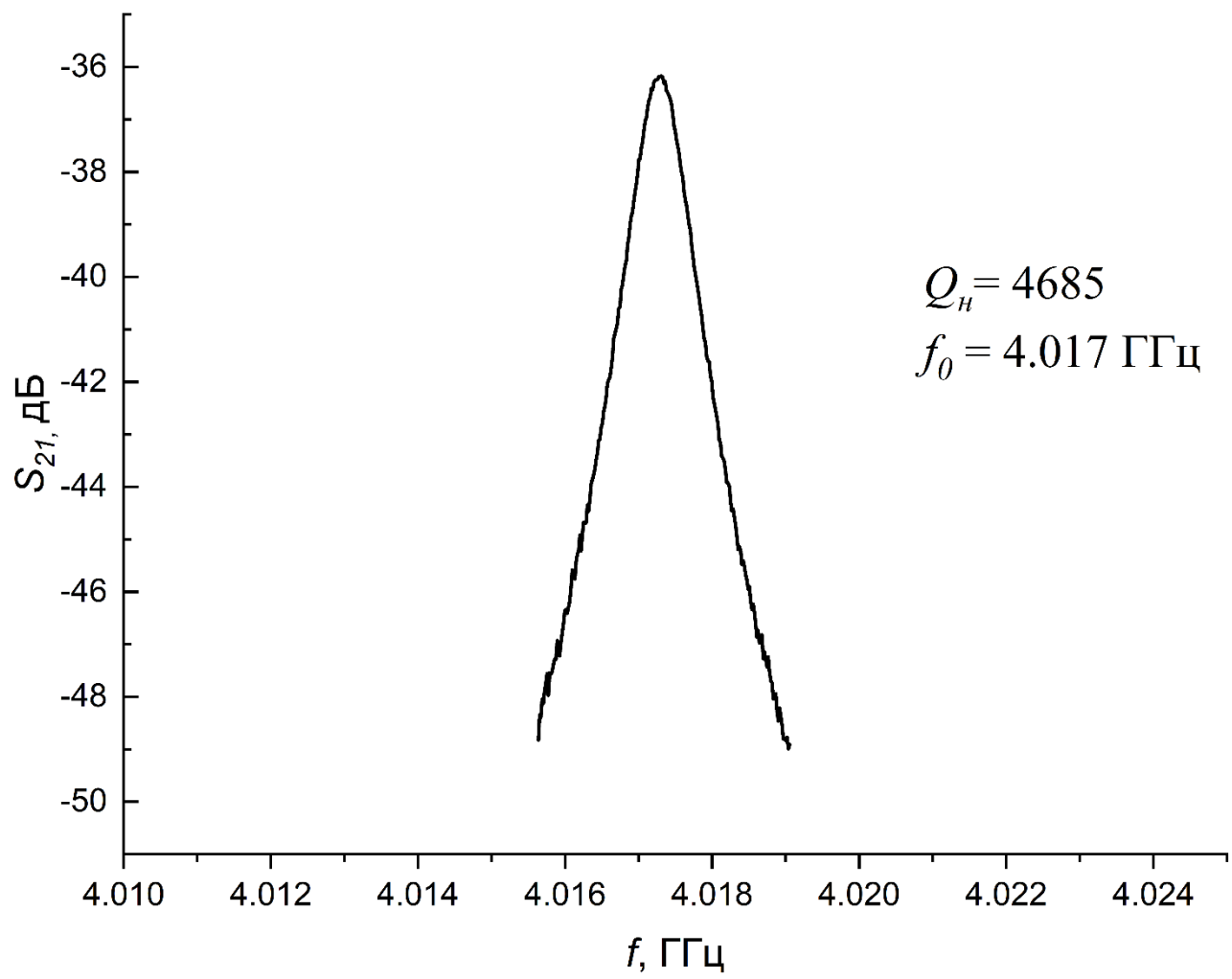


Рис. 5

Для связи с авторами:

Нуриахметов Заур

E-mail: zaur.nuriakhmetov@gmail.com

Черноусов Юрий

E-mail: chern@catalysis.ru

Тел.: 8-913-395-33-84 (моб.)

Смовж Дмитрий

E-mail: smovzh@itp.nsc.ru

Для переводчика:

**~~COAXIAL RESONATOR IN A CIRCULAR LOCKED MODE WAVEGUIDE TO
STUDY THE INFLUENCE OF COPPER SURFACE MODIFICATION ON ITS
CONDUCTIVITY~~**

~~A resonator on a locked mode in a transcendental waveguide is presented. The resonator contains a segment of a cylinder mounted in a circular waveguide coaxially with its inner surface. The electromagnetic field was localized near the cylinder and a resonance was excited at a frequency of 4 GHz on the TEM mode. The cutoff frequency for the lower TE_{11} mode in the selected waveguide was about 7 GHz, therefore, at lower frequencies, the electromagnetic wave could not propagate along the waveguide and the locked TEM mode was implemented. The cutoff frequency for the TE_{11} mode was about 7 GHz, so the electromagnetic field was localized in the waveguide only near the cylinder and could not propagate along the waveguide. The main losses are concentrated in the cylinder, which makes it possible to use this resonator to study the effect of modification of the cylinder surface on its Q-factor. The paper describes the method of using such a resonator for these purposes, and presents the results of a study of the effect of annealing and graphene coating of the copper surface on its properties. Graphene was synthesized on copper by chemical deposition from the gas phase (CVD).~~

~~Keywords: forbidden waveguide, surface modification, conductivity, transcendent waveguide~~

~~ЛИТЕРАТУРА~~

~~1. Park JH, Park JG // SN Applied Sciences. 2020. V. 2. Iss. 5.~~

~~<https://doi.org/10.1007/s42452-020-2819-8>~~

~~2. Zhuze V. P., Kurchatov B.V. // Physik. Z. Sowjetunion. 1932. V. 2. P. 453.~~

~~3. Nuriakhmetov Z., Chernousov Y., Sakhapov S., Smovzh D. // Nanotechnology. 2023. V. 34. №20.~~

~~<https://doi.org/10.1088/1361-6528/acbb7d>~~

~~4. Pozar D. M. Microwave Engineering. New York: Wiley, 2004.~~