



Известия Саратовского университета. Новая серия. Серия: Физика. 2021. Т. 21, вып. 4. С. 355–362

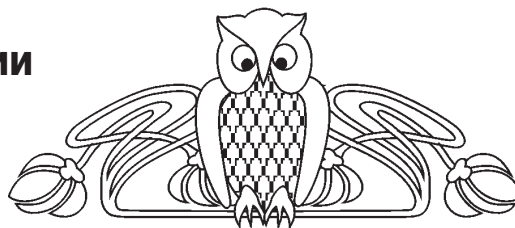
*Izvestiya of Saratov University. Physics*, 2021, vol. 21, iss. 4, pp. 355–362

<https://fizika.sgu.ru>

<https://doi.org/10.18500/1817-3020-2021-21-4-355-362>

Научная статья  
УДК 621.315:616.95.96

## Электрические свойства композиции на основе полидиметилсилоксана, наполненного оксидом галлия



В. Ю. Чухланов<sup>✉</sup>, О. Г. Селиванов, Н. В. Чухланова

Владимирский государственный университет имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых (ВлГУ), Россия, 600000, г. Владимир, ул. Горького, д. 87

Чухланов Владимир Юрьевич, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры химии, [krypton36@internet.ru](mailto:krypton36@internet.ru), <https://orcid.org/0000-0002-2995-388X>

Селиванов Олег Григорьевич, научный сотрудник кафедры биологии и экологии, [selivanov6003@mail.ru](mailto:selivanov6003@mail.ru), <https://orcid.org/0000-0003-3674-0660>

Чухланова Наталия Владимировна, научный сотрудник кафедры биологии и экологии, [natalyferre@yandex.ru](mailto:natalyferre@yandex.ru), <https://orcid.org/0000-0002-0243-2427>

**Аннотация.** Исследовано влияние введенного в полидиметилсилоксановый эластомер  $\beta$ -оксида галлия на электрические свойства композиционного материала. По изменению удельной объемной электрической проводимости от содержания оксида галлия экспериментально установлена зависимость электрического сопротивления композиции и определена точка перколяции. Точка перколяции составила 21%, что несколько выше теоретического значения, рассчитанного по методу Монте-Карло и составляющего 16%. Определена температурная зависимость электрического сопротивления композиции от содержания в связующем полупроводникового наполнителя. Волноводным методом на лабораторном стенде на основе прецизионной измерительной линии P1-20 исследованы диэлектрические характеристики материала, такие как тангенс угла диэлектрических потерь и диэлектрическая проницаемость. Расчеты диэлектрических характеристик проводились по изменению смещения узлов стоячих волн в волноводе при помещении в него диэлектрика с использованием программы MathCAD. Проведенный эксперимент по определению тангенса угла диэлектрических потерь во всем X-диапазоне от 8 до 12 ГГц показал, что введение оксида галлия приводит к возрастанию диэлектрических потерь в композиции. Диэлектрические потери в композиции возникают с возрастанием частоты. Диэлектрические характеристики в значительной степени ухудшаются при содержании наполнителя свыше 20% (по объему). Изучено влияние наполнителя на радиопрозрачные и радиопоглощающие свойства полимерной композиции в сантиметровом СВЧ-диапазоне. Результаты работы могут найти прикладное применение в радиоэлектронной промышленности для герметизации электронных компонентов и в антенно-фидерной технике сантиметрового радиодиапазона.

**Ключевые слова:** метод Монте-Карло, оксид галлия, СВЧ-излучение, измерительная линия, полисилоксаны, коэффициент отражения, удельное сопротивление, диэлектрические потери, диэлектрическая проницаемость

**Для цитирования:** Чухланов В. Ю., Селиванов О. Г., Чухланова Н. В. Электрические свойства композиции на основе полидиметилсилоксана наполненного оксидом галлия // Известия Саратовского университета. Новая серия. Серия: Физика. 2021. Т. 21, вып. 4. С. 355–362. <https://doi.org/10.18500/1817-3020-2021-21-4-355-362>

Статья опубликована на условиях лицензии Creative Commons Attribution 4.0 International (CC-BY 4.0)

Article

### Electrical properties of a composition based on polydimethylsiloxane filled with gallium oxide

V. Yu. Chukhlanov<sup>✉</sup>, O. G. Selivanov, N. V. Chukhlanova

Vladimir State University named after Alexander Grigoryevich and Nikolai Grigoryevich Stoletov (VISU), 87 Gorky St., Vladimir 600000, Russia

Vladimir Yu. Chukhlanov, [krypton36@internet.ru](mailto:krypton36@internet.ru), <https://orcid.org/0000-0002-2995-388X>

Oleg G. Selivanov, [selivanov6003@mail.ru](mailto:selivanov6003@mail.ru), <https://orcid.org/0000-0003-3674-0660>

Natalia V. Chukhlanova, [natalyferre@yandex.ru](mailto:natalyferre@yandex.ru), <https://orcid.org/0000-0002-0243-2427>

**Abstract.** In the present paper, the effect of gallium  $\beta$ -oxide introduced into the polydimethylsiloxane elastomer on the electrical properties of the composite material is investigated. The dependence of the electrical resistance of the composition on the change in the specific volume electrical conductivity on the content of gallium oxide is established experimentally and the percolation point is determined. The percolation point is 21%, which is slightly higher than the theoretical value calculated by the Monte Carlo method and is 16%. The temperature dependence of the electrical resistance of the composition on the content of the semiconductor filler in the binder is determined. The dielectric characteristics of



the material, such as the tangent of the dielectric loss angle and the permittivity, are studied using the waveguide method on a laboratory stand based on a precision measuring line P1-20. The dielectric characteristics are calculated by changing the displacement of the standing wave nodes in the waveguide when a dielectric is placed in it using the MathCAD program. An experiment to determine the tangent of the dielectric loss angle in the entire X-band from 8 GHz to 12 GHz has shown that the introduction of gallium oxide leads to an increase in the dielectric losses in the composition. Additional dielectric losses in the composition occur with increasing frequency. The dielectric characteristics are significantly degraded when the filler content exceeds 20% (by volume). The influence of the filler on the radio-transparent and radio-absorbing properties of the polymer composition in the centimeter microwave range is studied. The results of the work can be applied in various sectors of the national economy, including radio electronics, microwave technology and medical technology to partially reduce the background of electromagnetic radiation.

**Keywords:** Monte Carlo method, gallium oxide, microwave radiation, measuring line, polysiloxanes, reflection coefficient, resistivity, dielectric loss, permittivity

**For citation:** Chukhlanov V. Yu., Selivanov O. G., Chukhlanova N. V. Electrical properties of a composition based on polydimethylsiloxane filled with gallium oxide. *Izvestiya of Saratov University. Physics*, 2021, vol. 21, iss. 4, pp. 355–362 (in Russian). <https://doi.org/10.18500/1817-3020-2021-21-4-355-362>

This is an open access article distributed under the terms of Creative Commons Attribution 4.0 International License (CC-BY 4.0)

## Введение

Интерес к полиорганосилоксановым полимерам связан с их устойчивостью к неблагоприятным факторам: УФ-излучению, термическому воздействию, сопротивлению к действию микроорганизмов [1, 2]. Для улучшения физико-механических, теплофизических, электрических свойств полисилоксановые полимеры подвергаются модификации. Одним из распространенных направлений модификации является введение наполнителей. Так, например, многочисленные исследования подтверждают тот факт, что введение оксидов титана и железа способствует повышению термической устойчивости полисилоксанов [3, 4]. Предполагается, что процесс связан с протеканием химического взаимодействия этих соединений с полиорганосилоксаном с образованием более устойчивых элементарноорганосилоксановых соединений [5]. В связи с этим отмечается прикладное применение этих материалов в теплозащитных и герметизирующих материалах для различных отраслей науки и техники, в том числе при проектировании и строительстве орбитальных и межпланетных космических аппаратов [6]. Однако при использовании этих оксидов, многие из которых обладают полупроводниковыми свойствами, наблюдается изменение проводящих характеристик композиций. Например, в последние годы проводятся исследования по применению полисилоксановых композиций, наполненных полупроводящими оксидами металлов в качестве теплопроводящих паст для процессоров и других микроэлектронных устройств. Несмотря на высокие теплопроводящие характеристики, электрическая проводимость существующих композиций достаточно высока, что препятствует их прикладному применению. То же относится и к герметизирующим составам для микроэлектронных устройств.

Можно предположить, что снизить электрическую проводимость композиций позволит использование в качестве наполнителей оксидов металлов с широкой запрещенной зоной. Одним из наиболее интересных представителей такого рода материалов является  $\beta$ -оксид галлия  $Ga_2O_3$ . Оксид галлия относят к полупроводникам, превосходящим по ширине запрещенной зоны и величине пробивного электрического поля традиционные нитрид галлия и карбид кремния. Запрещенная зона оксида галлия составляет 4.8 eV [7, 8]. Проведенный авторами анализ отечественной и иностранной литературы показал, что сведения об электрических свойствах полимерных композиций, наполненных оксидом галлия, отсутствуют.

В данной статье с точки зрения физического материаловедения представлены результаты исследований электрических свойств полимерных композиций на основе полидиметилсилоксанового эластомера, наполненного  $\beta$ -оксидом галлия (III).

## Методика исследований

В качестве связующего использовался низкомолекулярный диметилсилоксановый каучук СКТН-1 с концевыми гидроксильными группами. В качестве отвердителя – катализатор К-18 (смесь диэтилдикаприлата олова и тетраэтоксилана). В качестве наполнителя –  $\beta$ -оксид галлия (III) марки “осч”.

*Получение образцов.* В кремнийорганический каучук СКТН-1 добавляли заданное экспериментом количество оксида галлия, и смесь тщательно перетиралась в фарфоровой ступке в течение двух часов. После этого в полученную смесь добавлялся катализатор К-18 из расчета 4 массовые части катализатора на 100 массовых частей каучука и после интенсивного перемешивания в течение пяти минут композиция в



тестообразном виде загружалась в формы, где и происходило отверждение образцов в течение 72 ч при температуре 25°C.

Для измерения электрической проводимости композиции использовалась измерительная ячейка, состоящая из двух электродов из нержавеющей стали (один подвижный и один неподвижный) и прижимного устройства. Перед измерением торцы образца, контактирующие с электродами, обрабатывались электропроводящей пастой. Размер образцов, последующие измерения и обработка результатов осуществлялись в соответствии с ГОСТ 6433.2 (ASTM D257). Материалы электроизоляционные твердые. Метод определения электрического сопротивления. В качестве регистратора данных при измерении электрической проводимости использовался высокоточный тераомметр UNI-T, работающий под управлением ОС Windows 10.

Определение диэлектрических характеристик и коэффициента отражения в сантиметровом СВЧ-диапазоне от 8 до 12 ГГц (X-диапазон) проводили волноводным методом. Измерительный комплекс состоял из прецизионной измерительной линии P1-20, перестраиваемого генератора M31102-1 (8–12 ГГц), ферритового вентиля и отрезка волновода стандартного сечения 10 × 23 мм. Торцы волновода накоротко замыкался посеребренной медной пластиной. Перед пластиной размещался исследуемый образец (нагрузка). На основе измерений напряженности поля определялся коэффициент стоячей волны КСВН. В качестве регистратора данных при определении КСВН использовался прецизионный мультиметр Rigol 3058, работающий совместно с персональным компьютером под управлением ОС Windows. Диэлектрическая проницаемость определялась по смещению узлов стоячей волны при внесении образца в волновод [9, 10]. Последующая математическая обработка результатов эксперимента проводилась с использованием математических пакетов Mathcad и OriginLab.

### Результаты и их обсуждение

Большинство проводящих и полупроводящих полимерных композиций представляют собой наполнитель в виде соприкасающихся по всему объему полимера дисперсных частиц, равномерно распределенных в полимерной матрице. Типичные электропроводящие композиции – это полимеры, наполненные электропроводным техническим углеродом, получаемым печным способом из жидкого углеводородного сырья. В

таких композициях в ряде случаев наблюдается образование проводящих кластеров из наночастиц углерода за счет наличия на поверхности частиц адсорбционно-активных участков. К композициям аналогичного типа относят и полимеры, наполненные углеродными нанотрубками [11]. Проведенные на микроанализаторе Horiba LB-550 (Horiba Ltd., Япония) исследования используемого в работе оксида галлия показали, что по размерам частиц основная часть сосредоточена в субмикронной области 500–600 нм (рис. 1).

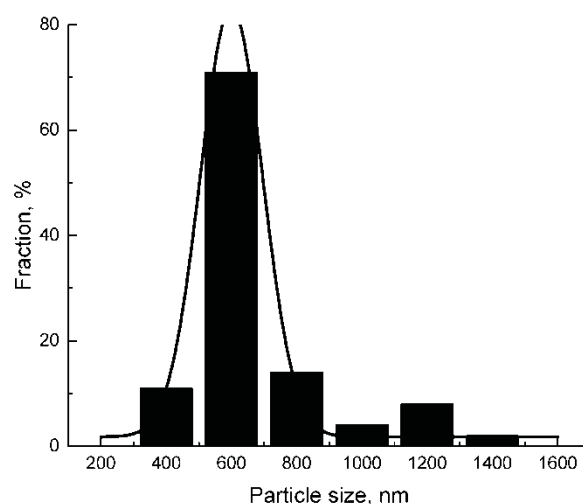


Рис. 1. Распределение размера частиц оксида галлия по фракциям

Fig. 1. Distribution of gallium oxide particle size by fractions

Распределение частиц полупроводникового наполнителя в композиции статистическое. Если исходить из теории перколяции для композиций с электропроводящим наполнителем, то электропроводность будет зависеть от объемной доли наполнителя [9]:

$$\sigma_{DC} \propto (v_f - v_{fc})^t, \quad (1)$$

где  $v_f$  – объемная доля проводящего компонента;  $v_{fc}$  – порог перколяции.

Моделирование методом Монте-Карло для композиции со сферическими частицами дает значение  $v_{fc} = 0.16$  [12].

Экспериментальные исследования зависимости электрического сопротивления полимерной композиции от содержания оксида галлия показали, что точка перехода перколяции на кривой соответствует 21% (объемному) содержания наполнителя в композиции (рис. 2). Просматривая дальнейший ход кривой по мере наполнения полидиметилсилоксана оксидом галлия, наблюдаем частичное снижение удельного сопротивления полимерной композиции.

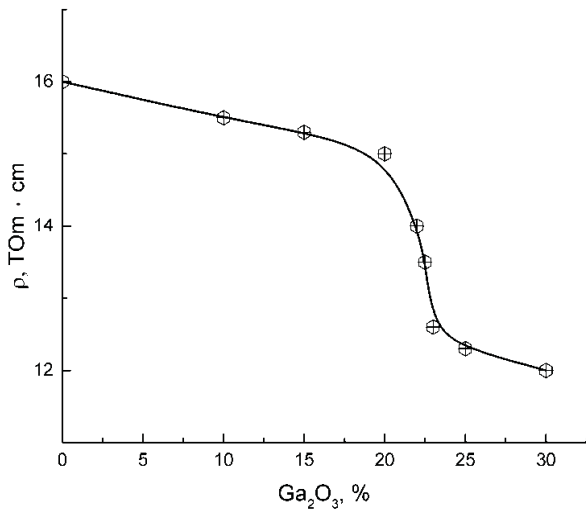


Рис. 2. Зависимость удельного электрического сопротивления композиции от содержания  $\beta$ -Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub>  
Fig. 2. Dependence of the specific electrical resistance of the composition on the content of  $\beta$ -Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub>

Теория перколяции не может точно предсказать значения порога для реальных композиционных материалов. Это связано с различием формы и размеров частиц наполнителя и возможным образованием проводящих кластеров. Экспериментально определенное значение по сравнению с моделью несколько сдвинуто в область более высоких концентраций наполнителя. В целом полученное экспериментальное значение точки перколяции свидетельствует о статистическом распределении частиц наполнителя в полимерной композиции.

#### *Зависимость электропроводящих свойств от температуры*

В общем случае с ростом температуры электрическое сопротивление композиционных материалов с электропроводящим наполнителем может как увеличиваться, так и уменьшаться. Проводимость будет определяться как температурной зависимостью удельной электрической проводимости наполнителя, так и коэффициентами теплового линейного расширения полимера. Можно предположить, что, несмотря на то, что оксид галлия, как и любой другой полупроводник, имеет положительный коэффициент электрической проводимости, в целом при повышении температуры проводимость композиции будет снижаться. Это предположение обусловлено тем, что коэффициент теплового линейного расширения полидиметилсилоксанового эластомера чрезвычайно высок и составляет  $2 \times 10^{-4} \text{ K}^{-1}$ , многократно превосходя коэффициент расширения оксида галлия [3]. На рис. 3 представлены экспе-

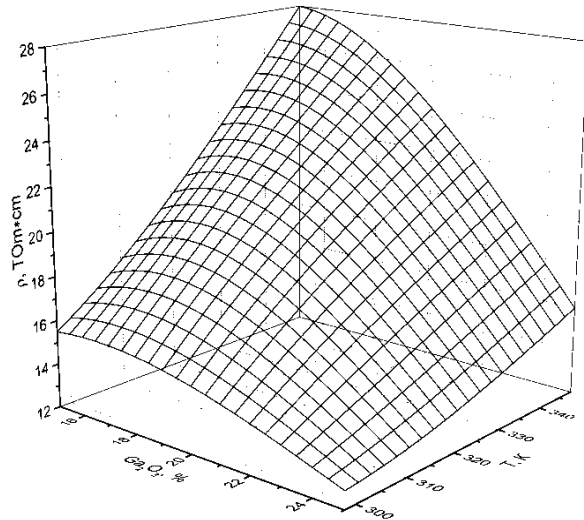


Рис. 3. Поверхность зависимости электрического сопротивления композиции от содержания  $\beta$ -Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub> и температуры  
Fig. 3. Surface of the dependence of the electrical resistance of the composition on the content of  $\beta$ -Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub> and temperature

риментальные зависимости электропроводности композиционного материала от температуры и содержания наполнителя в виде поверхности зависимости электрического сопротивления композиции от содержания оксида галлия и температуры.

В целом, как и предполагалось, зависимость носит восходящий характер, т.е. с повышением температуры удельное электрическое сопротивление возрастает. При этом с увеличением содержания наполнителя зависимость электропроводности от температуры начинает ослабевать, так как вклад связующего с высоким коэффициентом термического линейного расширения в характер температурной зависимости начинает резко падать.

#### *Диэлектрические свойства композиции в СВЧ-диапазоне*

Результаты исследований показали, что диэлектрическая проницаемость в значительной степени зависит от содержания наполнителя. Диэлектрическую проницаемость композиции сравнительно легко можно рассчитать по формуле Лихтенекера [13]:

$$\ln \varepsilon_r = \theta_1 \ln \varepsilon_{r1} + \theta_2 \ln \varepsilon_{r2}, \quad (2)$$

где  $\varepsilon_{r1}$ ,  $\varepsilon_{r2}$  – диэлектрическая проницаемость 1-го и 2-го компонентов соответственно;  $\theta_1$ ,  $\theta_2$  – объемные доли 1-го и 2-го компонентов соответственно.

На рис. 4 приведены расчётная (кривая 1) и экспериментальная (кривая 2) зависимости диэлектрической проницаемости композиции

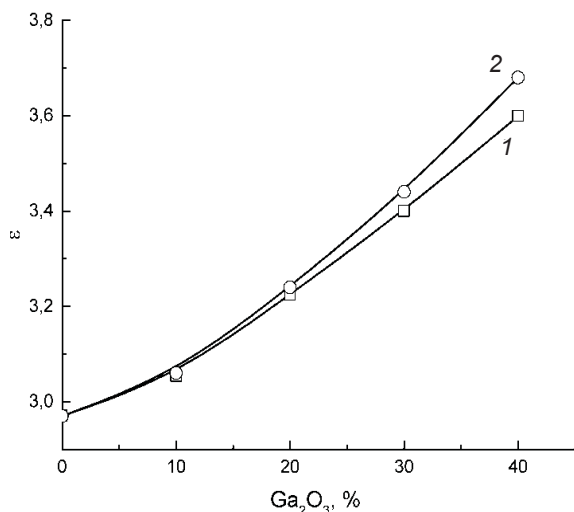


Рис. 4. Зависимость диэлектрической проницаемости от содержания  $\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$ : 1 – расчетная, 2 – экспериментальная

Fig. 4. Dependence of the permittivity on the content of  $\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$ : 1 – calculated, 2 – experimental

на частоте 9.8 ГГц, исходя из количества добавленного в них оксида галлия. Диэлектрическая проницаемость полидиметилсилоксана и  $\text{Ga}_2\text{O}_3$  составляла 2.98 и 9.8 соответственно. На графической зависимости при содержании оксида галлия выше десяти процентов наблюдаются несколько большие значения коэффициента диэлектрической проницаемости, полученные экспериментально (кривая 2), по сравнению с расчетными значениями (кривая 1). Это, по всей видимости, связано с наличием на поверхности оксида галлия остаточной сорбированной влаги. Появление сорбированной влаги приводит к увеличению диэлектрической проницаемости и, соответственно, отклонению ее от расчетных значений. К сожалению, этот отрицательный эффект проявляется для большинства гетерогенных полимерных структур.

Один из важнейших показателей диэлектриков – это тангенс угла диэлектрических потерь. Величина тангенса угла диэлектрических потерь ( $\text{tang}$ ) в диэлектрике численно равна доле запасенной в диэлектрике энергии, необратимо рассеиваемой в виде теплового излучения. Поскольку в полимерах отдельные кинетические фрагменты макроцепей, их ответвления, боковые группы и отдельные группы атомов совершают независимые колебательные движения, то и возникающие диэлектрические потери могут носить различный характер в зависимости от размера кинетических фрагментов и собственной частоты их колебательных движений. Возникают дипольно-сегментальные

потери, обусловленные колебательными движениями фрагментов макроцепей, и дипольно-групповые потери, вызванные изменением ориентации полярных групп. Дипольно-сегментальные потери зависят от природы отвердителя и густоты сетки. Одной из особенностей диэлектрических свойств полимеров в СВЧ-диапазоне является наличие фоновых потерь, т. е. поглощения, слабо зависящего от частоты и температуры [9]. В работах, проведенных российскими и зарубежными исследователями, было показано, что в основном фоновые потери при прохождении СВЧ радиоизлучения через диэлектрический материал зависят от полярности основной цепи макромолекулы полимера. Увеличение числа мономерных звеньев сопровождается существенным возрастанием этих потерь [9, 10, 14].

Проведенный эксперимент по определению тангенса угла диэлектрических потерь во всем X-диапазоне от 8 до 12 ГГц (рис. 5) показал, что введение оксида галлия приводит к возрастанию диэлектрических потерь в композиции. Диэлектрические потери возникают с возрастанием от частоты. Так, в целом при введении оксида галлия в композицию в количестве 15% объемных (кривая 2) наблюдается незначительное увеличение тангенса угла диэлектрических потерь с ростом частоты с 0.027 при 8.5 ГГц до 0.032 при частоте 11.5 ГГц. При дальнейшем повышении содержания оксида галлия до 30% объемных (кривая 3) наблюдается резкое

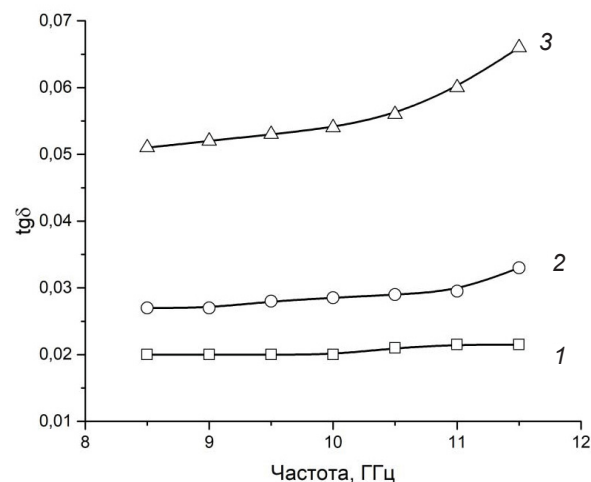


Рис. 5. Зависимость тангенса угла диэлектрических потерь от частоты: кривая 1 – без наполнителя, кривая 2 – 15%  $\text{Ga}_2\text{O}_3$ , кривая 3 – 30%  $\text{Ga}_2\text{O}_3$

Fig. 5. Dependence of the tangent of the dielectric loss angle on the frequency: 1 – without filler, 2 – 15%  $\text{Ga}_2\text{O}_3$ , 3 – 30%  $\text{Ga}_2\text{O}_3$



увеличение тангенса угла диэлектрических потерь с ростом частоты с 0.052 при 8.5 ГГц до 0.065 при частоте 11.5 ГГц. Ненаполненный полидиметилсилоксан представлен кривой 1. Кривая 1 характеризуется наименьшей зависимостью диэлектрических потерь от частоты.

Это вполне сочетается с полученными ранее данными по электрическому сопротивлению композиции. То есть при содержании наполнителя свыше 20% по объему образуется сплошная область из касающихся друг друга частиц полупроводника, приводящая к значительным диэлектрическим потерям в СВЧ-диапазоне.

*Поглощение, пропускание и отражение электромагнитного излучения полимерной композицией в сантиметровом СВЧ-диапазоне*

При небольшом содержании оксида галлия в композиции можно предположить, что материал будет иметь достаточно высокие диэлектрические характеристики. При использовании таких композиций в технике СВЧ часто используют понятие радиопрозрачность [10, 14]. Радиопрозрачность или коэффициент передачи ( $T$ ) можно определить либо экспериментально, пропуская электромагнитное излучение через образец, находящийся в свободном пространстве и измеряя интенсивность излучения до прохождения через материал и после, либо рассчитать, зная величину диэлектрической проницаемости и тангенса угла диэлектрических потерь [13, 15].

Для точных расчетов используют следующее выражение:

$$T = \frac{2\gamma\gamma_0}{(\gamma^2 + \gamma_0^2) \operatorname{sh}\gamma l + 2\gamma\gamma_0 \operatorname{ch}\gamma l}. \quad (3)$$

В самом простом случае, когда не учитываются потери на границе поверхности, коэффициент передачи с достаточной точностью можно рассчитать по формуле

$$T = \frac{\operatorname{tang} \delta \cdot 8.68 \cdot \pi \cdot \sqrt{1 + \varepsilon}}{\lambda_\varepsilon}, \quad (4)$$

где  $\lambda_\varepsilon$  – длина волны, см.

Эксперименты показали, что при возрастании в полимерной композиции концентрации оксида галлия от 0 до 20% коэффициент передачи снижается более чем в 30 раз. После точки перколяции композиция при толщине более 10 мм фактически не радиопрозрачна в X-диапазоне.

Исходя из того, что рассматриваемые полимерные композиции включают полупроводниковый наполнитель, можно предположить, что в изучаемом материале, возможно, будет проявляться поглощающий эффект. Об эффективности поглощения электромагнитной энергии обычно судят по коэффициенту поглощения  $Q$ , определяемому из следующего выражения:

$$Q = 1 - \Gamma - T. \quad (5)$$

Коэффициент отражения  $\Gamma$  определяется из формулы

$$\operatorname{КСВ}_H = \frac{1 + |\Gamma|}{1 - |\Gamma|}. \quad (6)$$

С учетом того, что при превышении точки перколяции коэффициент пропускания  $T$  стремится к нулю, при содержании оксида галлия в композиции свыше 20% в выражении (6) его можно не учитывать. Результаты эксперимента по определению коэффициентов отражения и поглощения в зависимости от содержания полупроводникового наполнителя в композиции на частоте 9.8 ГГц представлены в таблице.

При малых концентрациях оксида галлия полидиметилсилоксан относительно прозрачен для электромагнитных волн сантиметрового диапазона и отражение преимущественно определяется короткозамыкающей пластиной. В области точки перколяции происходит интенсивное поглощение электромагнитного излучения, проходящего по образцу как в начале, так и после отражения от пластины, благодаря чему наблюдается резкое снижение коэффициента отражения и возрастание поглощения СВЧ излучения. При высоком содержании оксида галлия материал все более

**Результаты определения коэффициента отражения в зависимости от содержания оксида галлия**  
*Table. Results of determining the reflection coefficient as a function of the gallium oxide content*

Содержание оксида галлия, % (по объему) / Gallium oxide content, % (by volume)	Коэффициент стоячей волны в волноводе (9.8 ГГц) / Standing wave coefficient in the waveguide (9.8 GHz)	Коэффициент отражения (9.8 ГГц) / Reflection coefficient (9.8 GHz)	Коэффициент поглощения (9.8 ГГц) / Absorption coefficient (9.8 GHz)
0	12.1	0.81	–
10	6.3	0.62	–
20	4.8	0.59	–
30	3.4	0.21	0.79
40	2.1	0.15	0.85



уподобляется по проводимости полупроводнику, а отражение преимущественно происходит от границы образца. Однако при этом надо учитывать, что на поглощающие свойства материалов влияют множество факторов: геометрическая форма образца, распределение и концентрация наполнителя в полимерной матрице, размер частиц наполнителя, плотность материала и толщина образца, частота электромагнитного излучения и многие другие [14].

### Выводы

В представленной работе были изучены электрические свойства полимерных композиций на основе полидиметилсилоксанового эластомера, наполненного  $\beta$ -оксидом галлия (III).

По изменению удельного объемного электрического сопротивления была экспериментально определена точка перколяции, соответствующая 21% (по объему) содержанию наполнителя в полимере.

Экспериментально установлена зависимость удельного объемного электрического сопротивления от температуры и содержания наполнителя. Температурная зависимость электрического сопротивления ослабевает с ростом содержания оксида галлия в полидиметилсилоксане.

Волноводным методом определены диэлектрические характеристики композиции в диапазоне 8–12 ГГц. Диэлектрические потери в значительной степени возрастают при содержании  $\beta$ -оксида галлия свыше 20% (по объему).

При содержании  $\beta$ -оксида галлия не более 20% (по объему) композиция может найти применение в радиоэлектронной промышленности для герметизации радиоэлектронных устройств и в антенно-фидерной технике СВЧ-диапазона.

### Список литературы

1. Robeynsa C. L., Picardb François G. Synthesis, characterization and modification of silicone resins // An "Augmented Review" Progress in Organic Coatings. 2018. Vol. 125. P. 287–315. <https://doi.org/10.1016/j.porgcoat.2018.03.025>
2. Anthony J., O'Lenick Jr. Protective Coating Based on Organic Silicon Polymer of Ladder Structure Nanostructured with Alkoxysilane // Silicone Polymers: New Possibilities in Nanotechnology. ACS, Symposium Series, 2007. Vol. 96. P. 165–175.
3. Chukhlanov V. Yu., Tereshina E. N. Polyorganosiloxane-Based Heat-Resistant Sealant with Improved Dielectric Characteristics // Polymer Science. Series C. 2007. Vol. 9, № 3. P. 288–291.

4. Li Chen, Songgang Chai, Kai Liu, Nanying Ning, Jian Gao, Qianfa Liu, Feng Chen, Qiang Fu. Enhanced Epoxy/Silica Composites Mechanical Properties by Introducing Graphene Oxide to the Interface // ACS Appl. Mater. Interfaces. 2012. Vol. 8, № 4. P. 4398–4404.
5. Брык М. Т. Деструкция наполненных полимеров. М.: Химия, 1989. 192 с.
6. Fried J. R. Polymers in Aerospace Applications Reviews // Rapra Review Reports, Report 192. 2008. Vol. 16, № 12. P. 137–142.
7. He H., Blanco M. A., Pandey R. Electronic and thermodynamic properties of  $\text{Ga}_2\text{O}_3$  // Applied Physics Letters. 2006. Vol. 88, № 3. P. 9041–9042.
8. Yarullin A. F., Kusnetsova L. E., Yarullina A. F., Stoyanov O. V. Electrophysical properties of oligomer-polymer complexes based on heat-resistant oligoaryleneamines // Polymer Science. Series D. 2013. Vol. 6, № 2. P. 109–115.
9. Blythe T., Bloor D. Electrical Properties of Polymers. Cambridge University Press, 2008. 496 p.
10. Чухланов В. Ю., Селиванов О. Г. Диэлектрические свойства герметизирующей композиции на основе эпоксициановой смолы, модифицированной полиметилфенилсилоксаном, в сантиметровом СВЧ-диапазоне // Материаловедение. 2015. № 6. С. 31–36.
11. Wouterson E. M., Boey F. Y., Hu X., Wong S. C. Specific properties and fracture toughness of syntactic foam: Effect of foam microstructures // Composites Science and Technology. 2005. № 65. P. 1840–1847.
12. Landauer R. Zeitschrift für Physik // Condensed Matter. 1987. Vol. 68, № 2. P. 217–223.
13. Томилин В. И., Томилина Н. П., Бахтина В. А. Физическое материаловедение: в 2 ч. М.: Инфра-М, 2008. Ч. 1. Пассивные диэлектрики. 324 с.
14. Гуртовник И. Г., Соколов В. И., Трофимов Н. Н., Шалгунов С. И. Радиопрозрачные изделия из стеклопластиков. М.: Мир, 2003. 368 с.
15. Усанов Д. А., Скрипаль А. В., Феклистов В. Б., Вениз С. Б. Измерение параметров полупроводников, микро- и наноструктур на СВЧ. Саратов: Саратов. гос. ун-т, 2012. 55 с. URL: <https://www.sgu.ru/sites/default/files/textdocsfiles/2014/01/10/microwave2012.pdf>

### References

1. Robeynsa C. L., Picardb François G. Synthesis, characterization and modification of silicone resins. An "Augmented Review" Progress in Organic Coatings, 2018, vol. 125, pp. 287–315. <https://doi.org/10.1016/j.porgcoat.2018.03.025>
2. Anthony J., O'Lenick Jr. Protective Coating Based on Organic Silicon Polymer of Ladder Structure Nanostructured with Alkoxysilane. *Silicone Polymers: New Possibilities in Nanotechnology*, ACS, Symposium Series, 2007, vol. 96, pp. 165–175.
3. Chukhlanov V. Yu., Tereshina E. N. Polyorganosiloxane-Based Heat-Resistant Sealant with Improved Dielectric Characteristics. *Polymer Science. Series C*, 2007, vol. 49, no. 3, pp. 288–291.



4. Li Chen, Songgang Chai, Kai Liu, Nanying Ning, Jian Gao, Qianfa Liu, Feng Chen, Qiang Fu. Enhanced Epoxy/Silica Composites Mechanical Properties by Introducing Graphene Oxide to the Interface. *ACS Appl. Mater. Interfaces*, 2012, vol. 8, no. 4, pp. 4398–4404.
5. Brik M. T. *Destrukciya napolnenyh polimerov* [Destruction of Filled Polymers]. Moscow, Khimiya Publ., 1989. 192 p. (in Russian).
6. Fried J. R. Polymers in Aerospace Applications Reviews. *Rapra Review Reports, Report 192*, 2008, vol. 16, no. 12, pp. 137–142.
7. He H., Blanco M.A., Pandey R. Electronic and thermodynamic properties of Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub>. *Applied Physics Letters*, 2006, vol. 88, no. 3, pp. 9041–9042.
8. Yarullin A. F., Kusnetsova L. E., Yarullina A. F., Stoyanov O. V. Electrophysical properties of oligomer-polymer complexes based on heat-resistant oligoaryleneamines. *Polymer Science. Series D*, 2013, vol. 6, no. 2, pp. 109–115.
9. Blythe T., Bloor D. *Electrical Properties of Polymers*. Cambridge University Press, 2008. 496 p.
10. Chuhlanov V. Yu., Selivanov O. G. Dielectric properties of a sealing composition based on epoxy resin modified with polymethylphenylsiloxane in the centimeter microwave radio band. *Materials Science*, 2015, no. 6, pp. 31–36 (in Russian).
11. Wouterson E. M., Boey F. Y., Hu X., Wong S. C. Specific properties and fracture toughness of syntactic foam: Effect of foam microstructures. *Composites Science and Technology*, 2005, no. 65, pp. 1840–1847.
12. Landauer R. Zeitschrift für Physik. *Condensed Matter*, 1987, vol. 68, no. 2, pp. 217–223.
13. Tomilin V. I., Tomilina N. P., Bahtina V. A. *Fizicheskoe materialovedenie* [Physical Materials Science: in 2 parts]. Moscow, Infra-M Publ., 2008, part 1. Passive dielectrics. 324 p. (in Russian).
14. Gurtovnik I. G., Sokolov V. I., Trofimov N. N., Shhalgunov S. I. *Radioprozrachnye izdeliya iz stekloplastikov* [Radiotransparent Fiberglass Products]. Moscow, Mir Publ., 2003. 368 p. (in Russian).
15. Usanov D. A., Skripal A. V., Feklistov V. B., Venig S. B. *Izmerenie parametrov poluprovodnikov, mikro- i nanostruktur na SVCh* [Measurement of Parameters of Semiconductors, Micro- and Microwave Nanostructures on Microwave]. Saratov, Sarat. gos. un-t, 2012. 55 p. Available at: <https://www.sgu.ru/sites/default/files/text-docsfiles/2014/01/10/microwave2012.pdf> (in Russian).

Поступила в редакцию 08.06.2021, после рецензирования 18.08.2021, принята к публикации 15.09.2021  
Received 08.06.2021, revised 18.08.2021, accepted 15.09.2021