



Диэлектрические параметры полимеров и мономеров винилового ряда в микроволновом диапазоне длин волн

А.Б. Алыева*, С.А. Ананичева***, Т.О. Крапивницкая****✉,
Е.В. Колякина**, М.Ю. Глявин*, В.В. Паршин*, Е.А. Серов*

*Институт прикладной физики РАН, Нижний Новгород, Российская Федерация

**Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского,
Нижний Новгород, Российская Федерация

***Уфимский государственный нефтяной технический университет,
Уфа, Российская Федерация

Аннотация. Одной из быстроразвивающихся отраслей химической промышленности является производство полимерных материалов. Совершенствование способов синтеза высокомолекулярных соединений и изучение их физико-химических характеристик относятся к важным задачам синтетической химии. Основным методом получения полимерных материалов на данный момент является радикальная полимеризация, имеющая такие преимущества, как простота реализации процесса, низкая себестоимость, возможность получения широкого круга полимерных материалов. В представленной работе приведены результаты исследований диэлектрических параметров в диапазоне частот 100–200 ГГц (показателя преломления и тангенса угла диэлектрических потерь $\tan\delta$) различных высокомолекулярных соединений (полистирол, поливинилхлорид, поливинилацетат, поливиниловый спирт, полиглицидилметакрилат) – как синтезированных с участием традиционного инициатора динитрила азобисизомасляной кислоты по механизму радикальной полимеризации, так и коммерческих продуктов. Проведен сравнительный анализ поглощающей способности полимеров при комнатной температуре, определены полимеры, имеющие наибольшую и наименьшую поглощающую способность. Зависимость $\tan\delta$ от частоты для всех исследуемых полимеров имеет линейный характер, причем с увеличением частоты поглощение в полимерах увеличивается. Наибольшее поглощение среди изученных макромолекул имеет полиглицидилметакрилат, при 200 ГГц значение $\tan\delta$ составляет 0,043, а минимальное значение $\tan\delta$, равное 0,0068, зафиксировано у полистирола. Значение показателя преломления для исследованных полимеров изменяется в интервале от 1,09 до 1,39. Также представлены результаты исследований диэлектрических свойств исходных виниловых мономеров (стирол, винилацетат, глицидилметакрилат). Указанные данные представляют практический интерес при разработке подходов к получению полимерных материалов с заданными характеристиками на основе виниловых мономеров методом радикальной полимеризации.

Ключевые слова: измерение диэлектрических характеристик, спектрометр на основе открытого резонатора, полистирол, поливинилхлорид, полиглицидилметакрилат, поливинилацетат

Финансирование. Исследование выполнено при поддержке государственного задания Института прикладной физики РАН на проведение научных исследований по теме № FFUF-2024-0027.

Для цитирования: Алыева А.Б., Ананичева С.А., Крапивницкая Т.О., Колякина Е.В., Глявин М.Ю., Паршин В.В. [и др.]. Диэлектрические параметры полимеров и мономеров винилового ряда в микроволновом диапазоне длин волн // Известия вузов. Прикладная химия и биотехнология. 2024. Т. 14. N 3. С. 323–330. DOI: 10.21285/achb.924. EDN: PUBDQY.

Dielectric parameters of polymers and monomers of the vinyl series in the microwave range

Alisa B. Alyeva*, Svetlana A. Ananicheva***, Tatiana O. Krapivnitckaia****✉,
Elena V. Kolyakina**, Mikhail Yu. Glyavin*, Vladimir V. Parshin*, Evgenii A. Serov*

*Institute of Applied Physics RAS, Nizhny Novgorod, Russian Federation

**Lobachevsky State University of Nizhny Novgorod, Nizhny Novgorod, Russian Federation

***Ufa State Petroleum Technical University, Ufa, Russian Federation

Abstract. The production of polymeric materials is one of the fast-growing sectors in the chemical industry. Improving methods for synthesizing high-molecular compounds and studying their physicochemical characteristics are important tasks of synthetic chemistry. Radical polymerization is currently the main method for producing polymeric materials. Its advantages involve simplicity and low cost, along with the possibility of obtaining a wide range of polymeric materials. The results of measuring the dielectric parameters of various high-molecular compounds (polystyrene, polyvinyl chloride, polyvinyl acetate, polyvinyl alcohol, poly(glycidyl methacrylate)) in the frequency range of 100–200 GHz (refractive index and dielectric loss tangent $\text{tg}\delta$) are presented. The compounds under study were both those synthesized by radical polymerization with the participation of the conventional initiator, i.e., azobisisobutyric acid dinitrile, and commercial products. The absorption capacity of polymers at room temperature was compared. Polymers with the highest and lowest absorption capacity were determined. The dependence of $\text{tg}\delta$ on frequency for all the polymers under study is linear, with absorption in the polymers increasing with frequency. Poly(glycidyl methacrylate) exhibits the highest absorption among the studied macromolecules with $\text{tg}\delta$ being equal to 0.043 at 200 GHz. The minimum $\text{tg}\delta$ value of 0.0068 was found for polystyrene. For the polymers under study, the refractive index value varies in the range from 1.09 to 1.39. In addition, dielectric properties of the original vinyl monomers (styrene, vinyl acetate, glycidyl methacrylate) were studied. The results are of interest when developing approaches to obtaining polymeric materials with specified characteristics based on vinyl monomers by the method of radical polymerization.

Keywords: measurement of dielectric characteristics, open resonator spectrometer, polystyrene, polyvinyl chloride, poly(glycidyl methacrylate), polyvinyl acetate

Funding. The research was carried out with the support of the state assignment of the Institute of Applied Physics of the Russian Academy of Sciences for scientific research on topic no. FFUF-2021-0001.

For citation: Alyeva A.B., Ananicheva S.A., Krapivnitckaia T.O., Kolyakina E.V., Glyavin M.Yu., Parshin V.V., et al. Dielectric parameters of polymers and monomers of the vinyl series in the microwave range. *Proceedings of Universities. Applied Chemistry and Biotechnology*. 2024;14(3):323-330. (In Russian). DOI: 10.21285/achb.924. EDN: PUBDQY.

Введение

В настоящее время наблюдается большой интерес к высокомолекулярным соединениям, который обусловлен возможностью получать на их основе материалы с широким диапазоном физико-химических свойств, что создает условия для использования данных соединений в различных областях электроники и микроэлектроники в качестве конструкционного материала [1–3]. Одним из основных методов синтеза высокомолекулярных соединений является радикальная полимеризация, которая используется для крупнотоннажного производства полимерных материалов как на основе виниловых мономеров, так и на основе акриловых, метакриловых кислот и их производных – эфиров, амидов, нитрилов и др. Радикальная полимеризация является приоритетным способом синтеза

полимерных материалов благодаря ряду преимуществ: низкой себестоимости продукции, простоте реализации процесса, полимеризации с участием широкого круга мономеров¹. Решение сложных задач синтеза основывается на исследовании специфических физико-химических характеристик макромолекул² [4]. Изучение диэлектрических свойств высокомолекулярных соединений позволяет целенаправленно синтезировать или усовершенствовать полимеры с целью адаптации их к потребностям определенной отрасли промышленности² [4] и диапазону частот.

Анализ литературы показал, что до настоящего времени проведены работы по исследованию диэлектрических свойств широкого ряда полимеров при частотах, не превышающих 10 ГГц, а также в терагерцовом интервале частот [5–10]. Тем не менее детальные

¹ Handbook of radical polymerization / eds K. Matyjaszewski, T.P. Davis. Hoboken: Wiley-Interscience, 2002. 936 p.

² Сулягин В.М., Ляпков А.А. Физико-химические методы исследования полимеров: учеб. пособие. СПб.: Лань, 2022. 140 с.

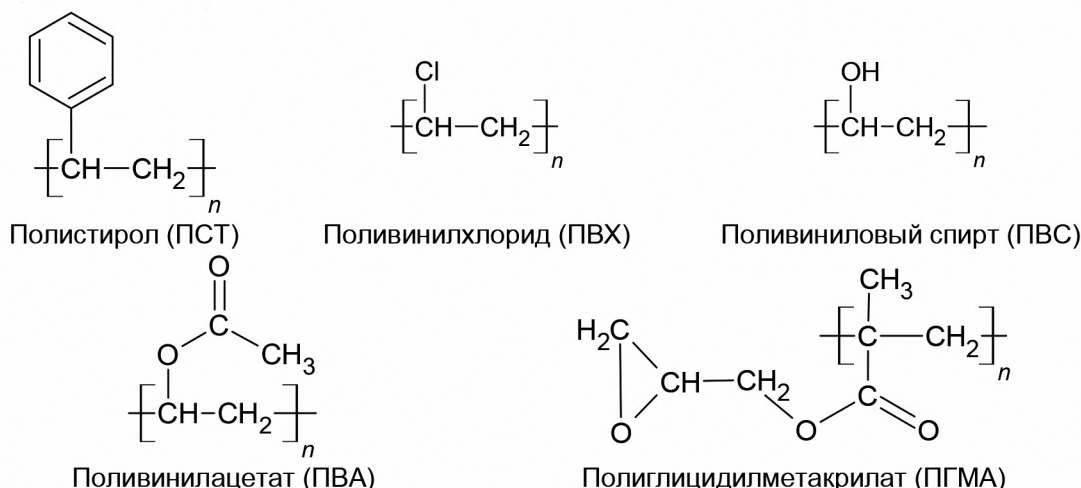


Рис. 1. Структурные формулы исследованных полимеров

Fig. 1. Structural formulas of the studied polymers

исследования характеристик ряда полимеров в промежуточном частотном диапазоне не проводились.

Целью данной работы являлось изучение диэлектрических свойств полимеров на основе виниловых мономеров – полистирола (ПСТ), поливинилхлорида (ПВХ), поливинилацетата (ПВА), поливинилового спирта (ПВС), полиглицидилметакрилата (ПГМА) – в диапазоне частот 100–200 ГГц, а также проведение сравнительного анализа с рядом исходных мономеров – стиролом (СТ), винилацетатом (ВА), глицидилметакрилатом (ГМА). Структурные формулы полимеров представлены на рис. 1.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

Органические растворители очищали по известным методикам [11]. СТ, ГМА очищали от стабилизатора (гидрохинона) многократным промыванием 10%-м водным раствором гидроксида натрия до обесцвечивания водной фазы. Затем промывали водой до нейтральной реакции индикатора. Сушили над прокаленным хлоридом кальция, затем над гидридом кальция. Далее мономеры очищали вакуумной перегонкой, собирая фракции с соответствующей температурой кипения при необходимом давлении [12]. ВА сушили над гидридом кальция и перегоняли при атмосферном давлении. Физико-химические константы очищенных мономеров соответствовали стандартным параметрам, приведенным в источнике [12]. Динитрил азобисизомасляной кислоты (ДАК) использовали в качестве инициатора. Он представлял собой коммерческий продукт, который очищали перекристаллизацией из этанола по стандартной методике [13].

Для синтеза полимеров в ампулы помещали по 2 мл раствора мономера (СТ, ВА, ГМА) и 1 мол.% инициатора ДАК. При пониженном давлении ампулу трижды дегазировали путем повторения циклов замораживания – размораживания до остаточного давления 2×10^{-2} мм рт. ст. и отпаивали. Ампулы выдерживали в термостате при температуре 70 °C (± 1 °C) (ПСТ – 8 ч, ПВА – 1 ч,

ПГМА – 0,2 ч). По истечении определенного времени ампулу вынимали и замораживали в жидком азоте для прерывания полимеризации. С целью очистки полимеров от остатков мономера образцы были растворены в хлористом метиле и в случае с ПСТ высажены в изопропиловый спирт, в случае с ПВА, ПГМА – в петролейный эфир. Затем при пониженном давлении и температуре 50 °C сушили до постоянной массы. Исследованный в работе ПВХ – коммерческий продукт марки ПВХ 267-RC. ПВС – коммерческий продукт марки ПВС 16/1, соответствующий ГОСТ 10779-78³. Молекулярно-массовые характеристики полимеров определяли методом гель-проникающей хроматографии на хроматографе KNAUER (Knauer, Германия), снабженном каскадом колонок Phenomenex (300×7,8 мм, фенгель, 10 мкм) с диаметром пор 105 и 103 Å и двумя детекторами (рефрактометрическим и ультрафиолетовым). Элюентом служил тетрагидрофуран, температура колонки составляла $25,0 \pm 0,1$ °C. Для калибровки применяли узкодисперсные стандарты ПСТ и полиметилметакрилата [14]. Синтезированные образцы полимеров перед измерениями были просеяны через сито с размером ячеек 400 мкм.

Для исследования диэлектрических свойств материалов использовался резонаторный спектрометр [15–17].

Порошкообразный полимер насыпался на плоское зеркало диаметром 40 мм с ограничительным кольцом. Общая толщина порошка не превышала 1,5 мм. Методика измерения порошков с помощью резонатора Фабри – Перо описана в работе [18]. Фотография резонатора с полимерным образцом представлена на рис. 2, а.

Для исследования СТ, ВА, ГМА также использовали резонаторный спектрометр [19] и модифицированный метод измерений для исследования агрессивных жидкостей. Жидкость заливалась в герметизированную кювету (рис. 2, б), образованную плоским зеркалом резонатора с одной стороны и плоскопараллельной

³ ГОСТ 10779-78. Спирт поливиниловый. Технические условия. М.: Издательство стандартов, 1987. 24 с.

пластиной, изготовленной из радиационно модифицированного тefлона (Арфлона), с другой.

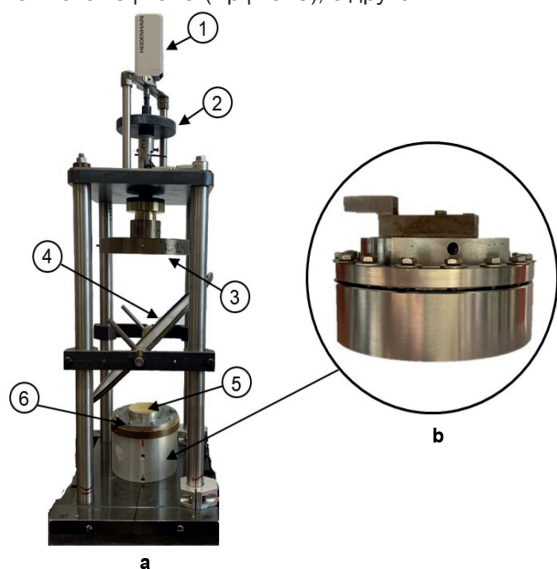


Рис. 2. Используемое оборудование: а – резонатор с полимерным образцом (1 – цифровой индикатор перемещения зеркала, сферическое зеркало, 2 – устройство перемещения зеркала, 3 – верхнее зеркало, 4 – пленка связи резонатора с источником сигнала и детектором, 5 – полимерный образец, 6 – подставка); б – кювета для исследования жидких образцов

Fig. 2. Equipment: a – resonator with a polymer sample (1 – digital indicator of mirror movement, spherical mirror, 2 – mirror moving device, 3 – top mirror, 4 – film for coupling the resonator with the radiation source and detector system, 5 – polymer sample, 6 – stand); b – photograph of a cuvette for studying liquid samples

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Проведено исследование полимеров на основе виниловых мономеров, синтезированных в присутствии радикального инициатора ДАК (ПСТ, ПВА, ПГМА), а также коммерческих продуктов (ПВХ, ПВС). В табл. 1 приведены результаты исследования диэлектрических свойств полимеров при частотах 100 и 200 ГГц.

Зависимость $\text{tg}\delta$ от частоты для всех исследуемых полимеров имеет квазилинейный характер, причем с увеличением частоты поглощающая способность полимеров увеличивается. Частотные зависимости $\text{tg}\delta$

представлены на рис. 3. Среди исследованных полимеров ПГМА, содержащий в своем составе эпоксидную группу, обладает наибольшей поглощающей способностью. Поглощающие свойства PST, синтезированного в условиях радикального иницирования, менее выражены, $\text{tg}\delta$ при 200 ГГц составляет 0,0068.

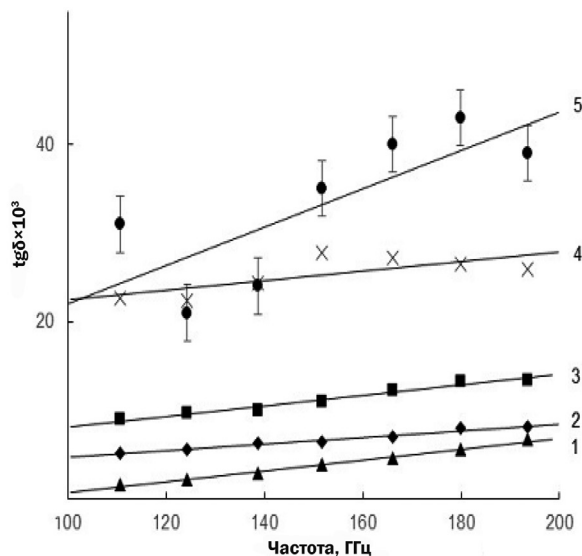


Рис. 3. Зависимость $\text{tg}\delta$ полимера от частоты: 1 – полистирол; 2 – поливинилхлорид; 3 – поливинилацетат; 4 – поливиниловый спирт; 5 – полиглицидилметакрилат

Fig. 3. Relationship between the polymer $\text{tan}\delta$ and frequency: 1 – polystyrene; 2 – polyvinyl chloride; 3 – polyvinyl acetate; 4 – polyvinyl alcohol; 5 – polyglycidyl methacrylate

Параллельно с целью выявления характерных особенностей проведены исследования диэлектрических свойств мономеров СТ, ВА и ГМА. Показано, что в исследуемом диапазоне частот межмолекулярные взаимодействия в PST имеют не столь решающее значение для поглощения в полимере (табл. 1, 2, рис. 4), то есть разница в поглощении мономера и полимера незначительна. Также в работе [6] было показано, что СТ и PST имеют схожие частотные зависимости коэффициента поглощения. Совершенно иная картина наблюдается в случае исходного мономера ВА и ПВА (табл. 1, 2). Мономер ВА как полярный диэлектрик обладает более выраженными поглощающими свойствами, в то время как в макромолекуле ПВА за счет межмолекулярных взаимодействий поглощение значительно снижается. Аналогичные закономерности наблюдаются и в случае ГМА и ПГМА (см. табл. 1, 2).

Таблица 1. Характеристики исследуемых полимеров

Table 1. Characteristics of the studied polymers

Полимер	n	$\text{tg}\delta \times 10^3$ (100 ГГц)	$\text{tg}\delta \times 10^3$ (200 ГГц)	$M_w \times 10^{-3}$, г/моль
Полистирол	1,09	0,6	6,8	225,0
Поливинилхлорид	1,26	4,6	8,4	145,2
Поливинилацетат	1,21	8,1	14,0	112,9
Поливиниловый спирт	1,33	22,0	28,0	–
Полиглицидилметакрилат	1,39	22,0	43,0	85,9

Таблица 2. Характеристики мономеров

Table 2. Characteristics of monomers

Мономер	n	$\text{tg}\delta \times 10^3$ (115 ГГц)	$\text{tg}\delta \times 10^3$ (196 ГГц)
Стирол	1,48	6,30	7,60
Глицидилметакрилат	1,70	100	150
Винилацетат	1,50	420	300

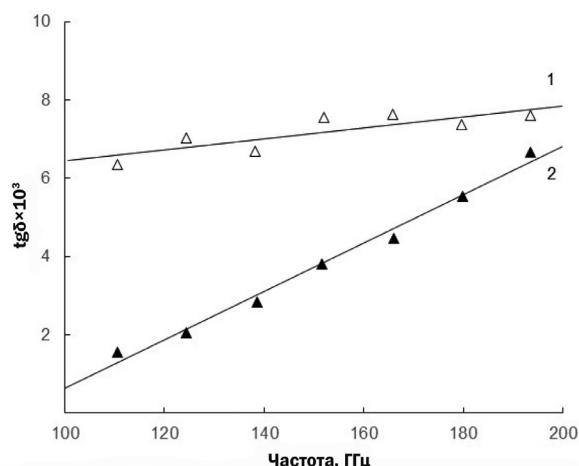


Рис. 4. Зависимость $\text{tg}\delta$ от частоты: 1 – стирол; 2 – полистирол

Fig. 4. Relationship between $\text{tan}\delta$ and frequency: 1 – styrene; 2 – polystyrene

Полученные данные о диэлектрических свойствах мономеров винилового ряда и полимеров представляют практический интерес при разработке подходов к получению полимерных материалов с заданными характеристиками методом радикальной полимеризации и развитию методов микроволнового синтеза полимеров [20].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На базе открытого высокочастотного резонатора Фабри – Перо исследованы диэлектрические параметры полимеров (показателя преломления и величин $\text{tg}\delta$) в диапазоне частот 100–200 ГГц. Проведен сравнительный анализ поглощающей способности полимеров при комнатной температуре. Выявлены полимеры, имеющие наименьшее поглощение. Наряду с этим анализированы исходные мономеры – СТ, ВА и ГМА. Показано, что полярные мономеры обладают большей поглощающей способностью по сравнению с неполярными.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

- Braun D., Cherdron H., Rehahn M., Ritter H., Voit B. Polymer synthesis: theory and practice. Berlin – Heidelberg: Springer-Verlag, 2013. 404 p. DOI: 10.1007/978-3-642-28980-4.
- Jiang L., Huang W., Xue X., Yang H., Jiang B., Zhang D., et al. Radical polymerization in the presence of chain transfer monomer: an approach to branched vinyl polymers // *Macromolecules*. 2012. Vol. 45, no. 10. P. 4092–4100. DOI: 10.1021/ma300443g.
- Shameem M.M., Sasikanth S.M., Annamalai R., Ganapathi Raman R. A brief review on polymer nanocomposites and its applications // *Materials Today: Proceedings*. 2021. Vol. 45. P. 2536–2539. DOI: 10.1016/j.matpr.2020.11.254.
- Лебедева О.В., Сипкина Е.И. Полимерные композиты и их свойства // *Известия вузов. Прикладная химия и биотехнология*. 2022. Т. 12. N 2. С. 192–207. DOI: 10.21285/2227-2925-2022-12-2-192-207. EDN: BSBTTQ.
- Wietzke S., Jansen C., Jung T., Reuter M., Baudrit B., Bastian M., et al. Terahertz time-domain spectroscopy as a tool to monitor the glass transition in polymers // *Opt Express*. 2009. Vol. 17, no. 21. P. 19006–19014. DOI: 10.1364/OE.17.019006.
- Fedulova E.V., Nazarov M.M., Angeluts A.A., Kitai M.S., Sokolov V.I., Shkurinov A.P. Studying of dielectric properties of polymers in the terahertz frequency range // *Saratov Fall Meeting 2011: Optical Technologies in Biophysics and Medicine XIII*. 2012. Vol. 8337. P. 833701. DOI: 10.1117/12.923855.
- Mumtaz M., Mahmood A., Khan S.D., Zia M.A., Ahmed M., Ahmad I. Investigation of dielectric properties of polymers and their discrimination using terahertz time-domain spectroscopy with principal component analysis // *Applied Spectroscopy*. 2017. Vol. 71, no. 3. P. 456–462. DOI: 10.1177/0003702816675361.
- D'Angelo F., Mics Z., Bonn M., Turchinovich D. Ultra-broadband THz time-domain spectroscopy of common polymers using THz air photonics // *Opt Express*. 2014. Vol. 22, no. 10. P. 12475–12485. DOI: 10.1364/OE.22.012475.
- Farman N., Mumtaz M., Mahmood M.A., Khan S.D., Zia M.A., Raffi M., et al. Investigation of optical and dielectric properties of polyvinyl chloride and polystyrene blends in terahertz regime // *Optical Materials*. 2020. Vol. 99. P. 109534. DOI: 10.1016/j.optmat.2019.109534.
- Sahin S., Nahar N.K., Sertel, K. Dielectric properties of low-loss polymers for mmW and THz applications // *Journal of Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves*. 2019. Vol. 40. P. 557–573. DOI: 10.1007/s10762-019-00584-2.
- Вайсбергер А., Проскауэр Э., Риддик Дж., Тупс Э. Органические растворители. Физические свойства и методы очистки / пер. с англ. М.: Издательство иностранной литературы, 1958. 519 с.
- Мономеры: сб. ст. / под ред. В.В. Коршака. Ч. 2. М.: Иностранная литература, 1953. 270 с.
- Emmons W.D. The preparations and properties of oxaziranes // *Journal of the American Chemical Society*. 1957. Vol. 79, no. 21. P. 5739–5744. DOI: 10.1021/ja01578a043.
- Беленький Б.Г., Виленчик Л.З. Хроматография полимеров. М.: Химия, 1978. 345 с.
- Паршин В.В., Третьяков М.Ю., Кошелев М.А., Серов Е.А. Аппаратурный комплекс и результаты прецизионных исследований распространения

миллиметровых и субмиллиметровых волн в конденсированных средах и атмосфере // Известия вузов. Радиофизика. 2009. Т. 52. N 8. С. 583–594. EDN: JVKTVI.

16. Parshin V.V., Tretyakov M.Yu., Koshelev M.A., Serov E.A. Modern resonator spectroscopy at submillimeter wavelengths // IEEE Sensors Journal. 2013. Vol. 13, no. 1. P. 18–23. DOI: 10.1109/JSEN.2012.2215315.

17. Власов С.Н., Копосова Е.В., Мазур А.Б., Паршин В.В. Об измерении диэлектрической проницаемости резонансным методом // Известия вузов. Радиофизика. 1996. Т. 39. N 5. С. 615.

18. Parshin V.V., Serov E.A., Vodopyanov A.V., Mansfeld D.A. Method to measure the dielectric parameters

of powders in subterahertz and terahertz ranges // IEEE Transactions on Terahertz Science and Technology. 2021. Vol. 11, no. 4. P. 375–380. DOI: 10.1109/TTHZ.2021.3076698.

19. Паршин В.В., Серов Е.А. Резонансный метод исследования диэлектрических жидкостей в миллиметровом и субмиллиметровом диапазонах длин волн // Известия вузов. Радиофизика. 2011. Т. 54. N 8-9. С. 701–707. EDN: OKXUWZ.

20. Зеленцова Н.В., Зеленцов С.В., Кузнецов М.В. Иницирование полимеризации виниловых мономеров микроволновым излучением малой интенсивности // Высокомолекулярные соединения. Серия Б. 2002. Т. 44. N 9. С. 1595–1597. EDN: QMKNAА.

REFERENCES

1. Braun D., Cherdrone H., Rehahn M., Ritter H., Voit B. *Polymer synthesis: theory and practice*. Berlin – Heidelberg: Springer-Verlag; 2013, 404 p. DOI: 10.1007/978-3-642-28980-4.

2. Jiang L., Huang W., Xue X., Yang H., Jiang B., Zhang D., et al. Radical polymerization in the presence of chain transfer monomer: an approach to branched vinyl polymers. *Macromolecules*. 2012;45(10):4092–4100. DOI: 10.1021/ma300443g.

3. Shameem M.M., Sasikanth S.M., Annamalai R., Ganapathi Raman R. A brief review on polymer nanocomposites and its applications. *Materials Today: Proceedings*. 2021;45:2536–2539. DOI: 10.1016/j.matpr.2020.11.254.

4. Lebedeva O.V., Sipkina E.I. Polymer composites and their properties. *Proceedings of Universities. Applied Chemistry and Biotechnology*. 2022;12(2):192–207. (In Russian). DOI: 10.21285/2227-2925-2022-12-2-192-207. EDN: BSBTTQ.

5. Wietzke S., Jansen C., Jung T., Reuter M., Baudrit B., Bastian M., et al. Terahertz time-domain spectroscopy as a tool to monitor the glass transition in polymers. *Opt Express*. 2009;17(21):19006–19014. DOI: 10.1364/OE.17.019006.

6. Fedulova E.V., Nazarov M.M., Angeluts A.A., Kitai M.S., Sokolov V.I., Shkurinov A.P. Studying of dielectric properties of polymers in the terahertz frequency range. *Saratov Fall Meeting 2011: Optical Technologies in Biophysics and Medicine XIII*. 2012;8337:833701. DOI: 10.1117/12.923855.

7. Mumtaz M., Mahmood A., Khan S.D., Zia M.A., Ahmed M., Ahmad I. Investigation of dielectric properties of polymers and their discrimination using terahertz time-domain spectroscopy with principal component analysis. *Applied Spectroscopy*. 2017;71(3):456–462. DOI: 10.1177/0003702816675361.

8. D'Angelo F., Mics Z., Bonn M., Turchinovich D. Ultra-broadband THz time-domain spectroscopy of common polymers using THz air photonics. *Opt Express*. 2014;22(10):12475–12485. DOI: 10.1364/OE.22.012475.

9. Farman N., Mumtaz M., Mahmood M.A., Khan S.D., Zia M.A., Raffi M., et al. Investigation of optical and dielectric properties of polyvinyl chloride and polystyrene blends in terahertz regime. *Optical Materials*. 2020;99:109534. DOI: 10.1016/j.optmat.2019.109534.

10. Sahin S., Nahar N.K., Sertel, K. Dielectric properties of low-loss polymers for mmW and THz applications. *Journal of Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves*. 2019;40:557–573. DOI: 10.1007/s10762-019-00584-2.

11. Weissberger A., Proskauer E.S., Riddick J.A., Toops E.E. *Organic Solvents. Physical properties and methods of purification*. New York: Interscience Publishers; 1955, 552 p. (Russ. ed.: *Organicheskie rastvoriteli. Fizicheskie svoystva i metody ochistki*. Moscow: Izdatel'stvo inostrannoi literatury; 1958, 519 p.).

12. Korshak V.V. *Monomers*. Part 2. Moscow: Inostrannaya literatura; 1953, 270 p. (In Russian).

13. Emmons W.D. The preparations and properties of oxaziranes. *Journal of the American Chemical Society*. 1957;79(21):5739–5744. DOI: 10.1021/ja01578a043.

14. Belen'kii B.G., Vilenchik L.Z. *Chromatography of polymers*. Moscow: Khimiya; 1978, 345 p. (In Russian).

15. Parshin V.V., Tretyakov M.Yu., Koshelev M.A., Serov E.A. Instrumental complex and the results of precise measurements of millimeter- and submillimeter-wave propagation in condensed media and the atmosphere. *Izvestiya vuzov. Radiofizika*. 2009;52(8):583–594. (In Russian). EDN: JVKTVI.

16. Parshin V.V., Tretyakov M.Yu., Koshelev M.A., Serov E.A. Modern resonator spectroscopy at submillimeter wavelengths. *IEEE Sensors Journal*. 2013;13(1):18–23. DOI: 10.1109/JSEN.2012.2215315.

17. Vlasov S.N., Kuposova E.V., Mazur A.B., Parshin V.V. On measuring dielectric permittivity by the resonance method. *Izvestiya vuzov. Radiofizika*. 1996;39(5):615. (In Russian).

18. Parshin V.V., Serov E.A., Vodopyanov A.V., Mansfeld D.A. Method to measure the dielectric parameters of powders in subterahertz and terahertz ranges. *IEEE Transactions on Terahertz Science and Technology*. 2021;11(4):375–380. DOI: 10.1109/TTHZ.2021.3076698.

19. Parshin V.V., Serov E.A. Resonance method for studying dielectric liquids in millimeter and submillimeter ranges of wavelengths. *Izvestiya vuzov. Radiofizika*. 2011;54(8-9):701–707. (In Russian). EDN: OKXUWZ.

20. Zelentsova N.V., Zelentsov S.V., Kuznetsov M.V. Initiation of vinyl polymerization by low-intensity microwave radiation. *Vysokomolekulyarnye soedineniya. Seriya B*. 2002;44(9):1595–1597. (In Russian). EDN: QMKNAА.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Алыева Алиса Биняминовна,

к.х.н., научный сотрудник,
Институт прикладной физики РАН,
603950, г. Нижний Новгород, ул. Ульянова, 46,
Российская Федерация,
a.alyeva@ipfran.ru
<https://orcid.org/0000-0003-3749-7738>

Ананичева Светлана Андреевна,

младший научный сотрудник,
Институт прикладной физики РАН,
603950, г. Нижний Новгород, ул. Ульянова, 46,
Российская Федерация,
аспирант,
Нижегородский государственный
университет им. Н.И. Лобачевского,
603022, г. Нижний Новгород, пр. Гагарина, 23,
Российская Федерация,
bulanova@ipfran.ru
<https://orcid.org/0000-0002-4008-3328>

Крапивницкая Татьяна Олеговна,

ведущий инженер,
Институт прикладной физики РАН,
603950, г. Нижний Новгород, ул. Ульянова, 46,
Российская Федерация,
аспирант,
Уфимский государственный нефтяной
технический университет,
450064, г. Уфа, ул. Космонавтов, 1,
Российская Федерация,
✉ kto@ipfran.ru
<https://orcid.org/0000-0002-4020-7482>

Колякина Елена Валерьевна,

д.х.н., доцент, профессор,
Нижегородский государственный
университет им. Н.И. Лобачевского,
603022, г. Нижний Новгород, пр. Гагарина, 23,
Российская Федерация,
kelena@ichem.unn.ru
<https://orcid.org/0000-0002-1275-1026>

Глявин Михаил Юрьевич,

д.ф.-м.н., заместитель директора учреждения
по научной работе, заведующий отделом
электронных приборов,
Институт прикладной физики РАН,
603950, г. Нижний Новгород, ул. Ульянова, 46,
Российская Федерация,
glyavin@ipfran.ru
<https://orcid.org/0000-0002-7896-9212>

Паршин Владимир Владимирович,

старший научный сотрудник,
Институт прикладной физики РАН,
603950, г. Нижний Новгород, ул. Ульянова, 46,
Российская Федерация,
parsh@ipfran.ru
<https://orcid.org/0000-0003-4334-7680>

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Alisa B. Alyeva,

Cand. Sci. (Chemistry), Researcher,
Institute of Applied Physics RAS,
46, Ulyanov St., Nizhniy Novgorod, 603950,
Russian Federation,
a.alyeva@ipfran.ru
<https://orcid.org/0000-0003-3749-7738>

Svetlana A. Ananicheva,

Junior Researcher,
Institute of Applied Physics RAS,
46, Ulyanov St., Nizhniy Novgorod, 603950,
Russian Federation,
Postgraduate Student,
Lobachevsky State University
of Nizhniy Novgorod,
23, Gagarin Ave., Nizhniy Novgorod, 603022,
Russian Federation,
bulanova@ipfran.ru
<https://orcid.org/0000-0002-4008-3328>

Tatiana O. Krapivnitckaia,

Leading Engineer,
Institute of Applied Physics RAS,
46, Ulyanov St., Nizhniy Novgorod, 603950,
Russian Federation,
Postgraduate Student,
Ufa State Petroleum Technical University,
1, Kosmonavtov St., Ufa, 450064,
Russian Federation,
✉ kto@ipfran.ru
<https://orcid.org/0000-0002-4020-7482>

Elena V. Kolyakina,

Dr. Sci. (Chemistry), Associate Professor,
Professor,
Lobachevsky State University
of Nizhniy Novgorod,
23, Gagarin Ave., Nizhniy Novgorod, 603022,
Russian Federation,
kelena@ichem.unn.ru
<https://orcid.org/0000-0002-1275-1026>

Mikhail Yu. Glyavin,

Dr. Sci. (Physics and Mathematics),
Deputy Director for Scientific Efforts,
Head of the Electronic Devices Department,
Institute of Applied Physics RAS,
46, Ulyanov St., Nizhniy Novgorod, 603950,
Russian Federation,
glyavin@ipfran.ru
<https://orcid.org/0000-0002-7896-9212>

Vladimir V. Parshin,

Senior Researcher,
Institute of Applied Physics RAS,
46, Ulyanov St., Nizhniy Novgorod, 603950,
Russian Federation,
parsh@ipfran.ru
<https://orcid.org/0000-0003-4334-7680>

Серов Евгений Александрович,
старший научный сотрудник,
Институт прикладной физики РАН,
603950, г. Нижний Новгород, ул. Ульянова, 46,
Российская Федерация,
serov@ipfran.ru
<https://orcid.org/0000-0002-9662-4277>

Evgenii A. Serov,
Senior Researcher,
Institute of Applied Physics RAS,
46, Ulyanov St., Nizhniy Novgorod, 603950,
Russian Federation,
serov@ipfran.ru
<https://orcid.org/0000-0002-9662-4277>

Вклад авторов

А.Б. Алыева – подготовка публикации.
С.А. Ананичева – обработка полученных данных.
Т.О. Крапивницкая – обсуждение результатов.
Е.В. Колякина – разработка концепции исследования.
М.Ю. Глявин – разработка концепции исследования.
В.В. Паршин – проведение измерений.
Е.А. Серов – осуществление расчетов.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

Информация о статье

Поступила в редакцию 13.10.2023.
Одобрена после рецензирования 18.04.2024.
Принята к публикации 30.08.2024.

Contribution of the authors

Alisa B. Alyeva – preparation of the publication.
Svetlana A. Ananicheva – data processing.
Tatiana O. Krapivnitckaia – results discussion.
Elena V. Kolyakina – research concept development.
Mikhail Yu. Glyavin – research concept development.
Vladimir V. Parshin – conducting experiments.
Evgenii A. Serov – calculations.

Conflict interests

The authors declare no conflict of interests regarding the publication of this article.

The final manuscript has been read and approved by all the co-authors.

Information about the article

The article was submitted 13.10.2023.
Approved after reviewing 18.04.2024.
Accepted for publication 30.08.2024.