

20 Температурная эволюция диэлектрического отклика α -лактозы моногидрата в терагерцовом диапазоне частот

© Г.А. Командин¹, О.Е. Породинков¹, В.С. Ноздрин¹, Г.Р. Мусина^{1,2}, Н.В. Черномырдин^{1,2},
К.И. Зайцев^{1,2}, И.Е. Спектор¹

¹Институт общей физики им. А.М. Прохорова РАН,
119991 Москва, Россия

²Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана,
105005 Москва, Россия

e-mail: gakomandin@mail.ru

Поступила в редакцию 31.12.2019 г.

В окончательной редакции 10.01.2020 г.

Принята к публикации 28.02.2020 г.

Проведены измерения спектров пропускания спрессованных микрокристаллических образцов α -лактозы моногидрата с помощью терагерцовой импульсной спектроскопии в температурном диапазоне существования твердой фазы 10–475 К. Анализ наблюдаемых линий поглощения с применением модели классического осциллятора позволил выявить сложную температурную эволюцию собственных частот резонансов, а также определить область существования фазы отклика α -лактозы моногидрата. Полученные данные могут найти практическое применение в различных областях терагерцовой оптики, включая фармакологию, пищевую индустрию, аналитическую химию и биофотонику.

Ключевые слова: терагерцовая импульсная спектроскопия, микрокристаллические органические соединения, дисахариды, α -лактоза моногидрат, диэлектрический отклик, необратимые фазовые переходы.

DOI: 10.21883/OS.2020.06.49406.20-20

Введение

Температурная стабильность полиморфных форм органических соединений является критически важным фактором для многих задач фармакологии, пищевой индустрии и биологии. Среди многочисленных методов контроля молекулярной и кристаллической структуры терагерцовая (ТГц) спектроскопия [1,2] в настоящее время еще не имеет столь же широкого распространения как спектроскопия комбинационного рассеяния света (КРС) и инфракрасная (ИК) спектроскопия, несмотря на ее большой потенциал. К преимуществам данного метода следует отнести низкую ионизирующую способность ТГц излучения и незначительное рассеяние ТГц излучения микрокристаллическими образцами [3,4]. Аппаратура ТГц импульсной спектроскопии не требует применения высокого напряжения или сильных магнитных полей и может быть выполнена в компактном и доступном варианте [5,6]. Хотя частотный диапазон, перекрываемый ТГц импульсной спектроскопией, меньше чем для традиционных методов ИК спектроскопии и КРС, этот метод является самодостаточным или может применяться в качестве дополнительного аналитического инструмента. Методы ТГц импульсной спектроскопии принципиально позволяют проводить *in situ* контроль качества материала (или препарата) непосредственно в ходе технологического цикла производства [7,8].

Среди многообразия органических соединений моно- и дисахариды являются необычайно удобными материалами для контроля их характеристик методами ТГц

диэлектрической спектроскопии, что определяется наличием в ТГц диапазоне высокодобротных линий поглощения. Анализ эволюции параметров этих линий позволяет контролировать структурные изменения в образцах. Отмеченные соединения нашли широкое практическое применение. В частности, их водные растворы используются в качестве гиперосмотических агентов для иммерсионного оптического просветления тканей в видимом, инфракрасном и ТГц диапазонах [9,10].

Процессы гидратации и дегидратации лактозы активно изучаются с использованием различных подходов, включая методы ТГц импульсной спектроскопии [11–14], поскольку они чувствительны к влагонасыщенности пористых сред [15]. Изучению трансформации молекулярной структуры органических кристаллов методами ТГц спектроскопии также посвящен ряд работ [16,17], из которых, в частности, следует, что методы ТГц спектроскопии обладают достаточной чувствительностью к регистрации трансформации колебательного спектра при изменениях молекулярной структуры.

Одним из широко распространенных дисахаридов является α -лактоза моногидрат (α -LM). На рис. 1 показана структура базиса монокристалла α -LM, схематично представленная по данным рентгеноструктурных исследований, опубликованных в работах [18,19].

Дисахарид (4-O- β -D-galactopyranosyl- α -D-glucopyranosemonohydrate) $2 \cdot (C_{12}H_{22}O_{11} \cdot H_2O)$ - α -LM состоит из двух моносахаридов — глюкозы и галактозы, объединенных гликозидной связью. В α -форме две

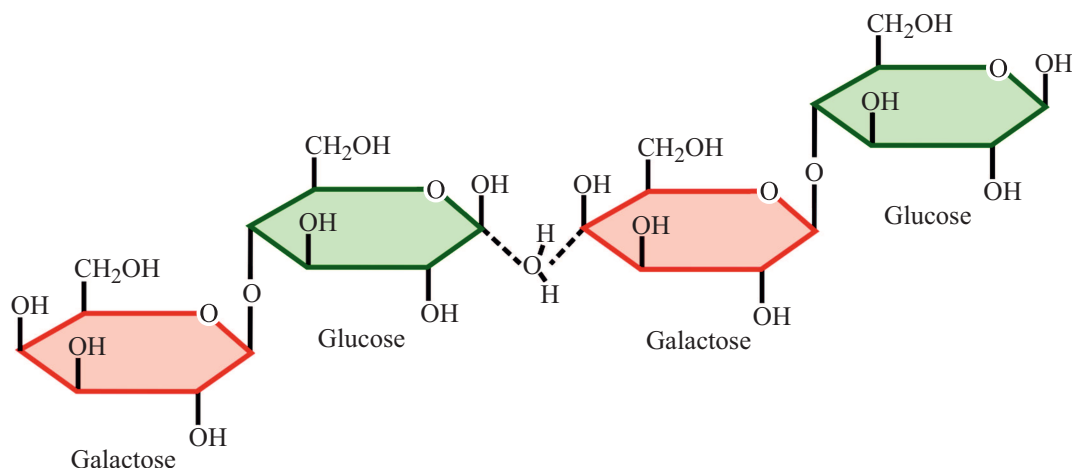


Рис. 1. Структура базиса кристалла α -лактозы моногидрата (α -LM) по данным [11,12].

молекулы лактозы связаны через молекулу H_2O , как показано на рис. 1. Наличие такой связи определяет узкий резонанс на частоте 17.6 cm^{-1} при комнатной температуре, в то время как в спектрах безводной β -формы лактозы этот резонанс не наблюдается [20].

Известно также наличие пиков поглощения на более высоких частотах [21]. В целом спектр электродипольных возбуждений α -LM при комнатной температуре может быть описан суммой высокооборотных резонансных линий, уширенных полос поглощения и квазирелаксационного фона [22].

В спектре α -LM есть, как минимум, две асимметричные полосы выше 50 cm^{-1} . Для выяснения структуры этих полос необходимы низкотемпературные измерения спектров пропускания α -LM, так как при понижении температуры константы затухания полос поглощения уменьшаются, что позволяет разрешить близкорасположенные резонансы с перекрывающимися контурами. При нагреве α -LM выше комнатной температуры изменение спектра может происходить не только за счет увеличения констант затуханий резонансов, но также и вследствие изменений молекулярной и кристаллической структур. Именно поэтому целью работы является изучение температурных преобразований в спектрах диэлектрического отклика α -LM методами ТГц импульсной спектроскопии и на их основе выявление трансформаций молекулярной структуры этого соединения. Для оценки границ температурной стабильности и наличия структурных переходов α -LM в работе рассматривается температурный диапазон от 10 К вплоть до температуры плавления — $T_{\text{melt}} = 476\text{ K}$.

Экспериментальное исследование и моделирование спектров

Для изготовления образцов использован микрокристаллический порошок α -лактозы моногидрата SuperTab[®] 30GRDFEpharma (Германия). Из этого

порошка изготовлены плоскопараллельные образцы диаметром 13 mm. Образцы спрессованы гидравлическим прессом LabTools (Россия) в стандартной откачиваемой пресс-форме „Spresac“ (Англия). Усилие прессования составило 20–30 kN. Образцы глюкозы были изготовлены прессованием по такой же методике, как и образцы лактозы. Для приготовления образцов использована кристаллическая глюкоза производства „Hungrana KFT“ (Венгрия). Спектры пропускания и фазового сдвига в ТГц диапазоне измерены на лабораторном спектрометре с временным разрешением (TDS) [5,6,22].

Следует отметить, что многие органические соединения, в частности сахара, при нагреве могут взаимодействовать с содержащимися в атмосфере азотом и кислородом. Для исключения таких реакций все измерения выполнены при низком остаточном давлении (не более 10^{-2} mbar) в рабочем объеме криостата и термостата. Это исключает не только изменение химического состава лактозы, но и влияние на получаемые спектры узких резонансных линий водяного пара атмосферы. Измерения выполнены по стандартной процедуре измерения фототока в приемной антенне спектрометра с образцом и без образца в ТГц тракте спектрометра. Далее с применением фурье-преобразования временных зависимостей фототока были рассчитаны спектры пропускания и фазового сдвига в образце. Измерения при низких температурах (от 300 до 10 К) выполнены в оптическом криостате, описание которого приведено в [6]. Измерения спектров пропускания в диапазоне температур от 300 до 475 К проведены в термостате. Поскольку давление в оптической камере спектрометра было таким же, как и в объеме печи, в данном эксперименте мы не использовали окна, поскольку их нагрев мог бы привести к изменениям в спектрах.

На низкочастотном краю диапазона мы дополнительно провели калибровочные измерения образцов лактозы с использованием когерентного спектрометра с квази-

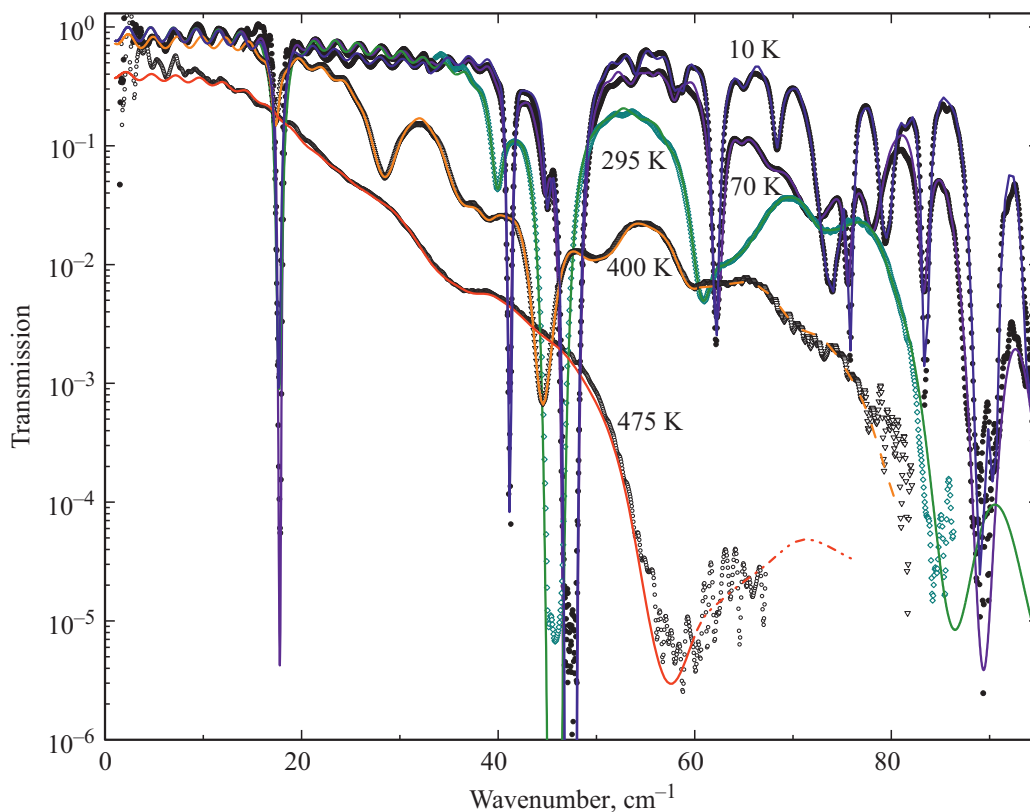


Рис. 2. Спектры пропускания α -LM при различных температурах: точки — экспериментальные данные, сплошные линии — моделирование полос поглощения с использованием выражения (1).

нохроматическим перестраиваемым по частоте генератором на основе ламп обратной волны (ЛОВ) [23].

Для моделирования спектров диэлектрического отклика в виде частотных зависимостей комплексной диэлектрической проницаемости мы использовали простую модель классического осциллятора:

$$\varepsilon(\nu) = \varepsilon_{\infty} + \sum_{j=1}^N \frac{\Delta\varepsilon_j \nu_j}{\nu_j^2 - \nu^2 + i\nu\gamma_j}. \quad (1)$$

Спектры действительной и мнимой частей комплексной диэлектрической проницаемости $\varepsilon(\nu) = \varepsilon(\nu) + i\varepsilon'(\nu)$ рассчитываются путем подбора параметров модели — диэлектрического вклада моды $\Delta\varepsilon_j$, ее частоты ν_j и константы затухания γ_j , при этом константа ε_{∞} включает в себя вклады всех высокочастотных процессов. Суммирование проводится по всем N осцилляторам. Параметры подбираются таким образом, чтобы минимизировать среднеквадратичное отклонение расчетного спектра пропускания от экспериментальных данных.

Результаты

Экспериментальные данные получены на ТГц импульсном спектрометре с шагом по температуре 10 К.

На рис. 2 показана выборка экспериментальных спектров, полученных при различных температурах в диапазоне от 10 до 475 К. Спектр пропускания α -LM при комнатной температуре схож с известными литературными данными [24,25]. Отметим, что две асимметричные полосы в области 60–75 cm^{-1} , наблюдаемые при комнатной температуре, разделяются на узкие резонансные линии при охлаждении. Изменение температуры приводит не только к изменению ширины линии, но также и к существенному смещению их резонансных частот.

Для перекрывающихся уширенных контуров можно использовать модель, учитывающую взаимодействие мод, например модель двух взаимодействующих гармонических осцилляторов, система уравнений движения которых имеет вид [26]

$$\begin{cases} \frac{\partial^2 y_1}{\partial t^2} + \Gamma \frac{\partial y_1}{\partial t} + (k_1 + k_{12})y_1 - k_{12}y_2 = e_1 E, \\ \frac{\partial^2 y_2}{\partial t^2} + \Gamma \frac{\partial y_2}{\partial t} + (k_2 + k_{12})y_2 - k_{12}y_1 = e_2 E, \end{cases} \quad (2)$$

где y — координата, k — возвращающая сила, Γ — коэффициент затухания, e — эффективный заряд и E — напряженность электрического поля. Для описания взаимодействия трех и более осцилляторов потребуется введение большего числа констант взаимодействия, однозначный выбор которых представляется затруднительным.

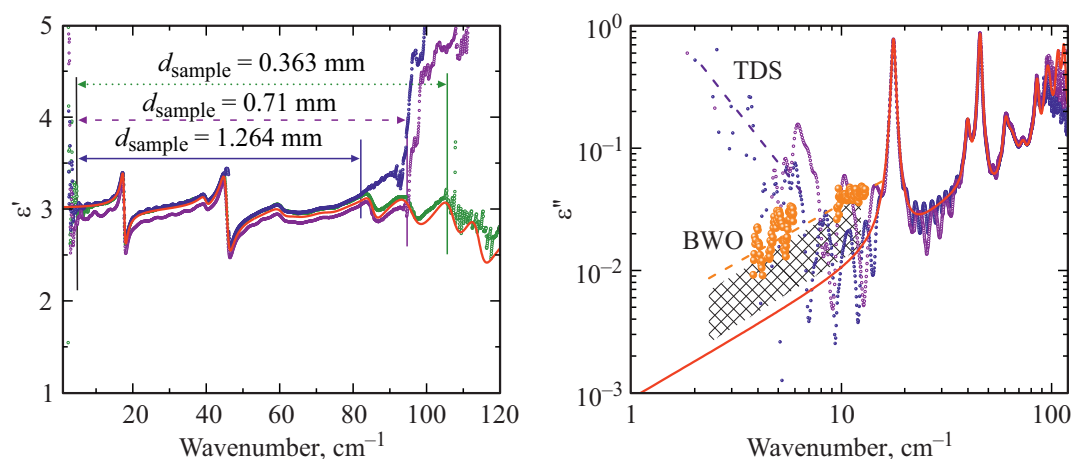


Рис. 3. Спектры действительной и мнимой частей комплексной диэлектрической проницаемости α -LM, полученные при комнатной температуре для образцов разных толщин (d): точки — прямой расчет с применением методов решения обратных задач ТГц импульсной спектроскопии; крупные символы — данные спектроскопии на базе ЛОВ; сплошная линия — оценка диэлектрической проницаемости с применением модели классического осциллятора. Штриховые линии даны для наглядности.

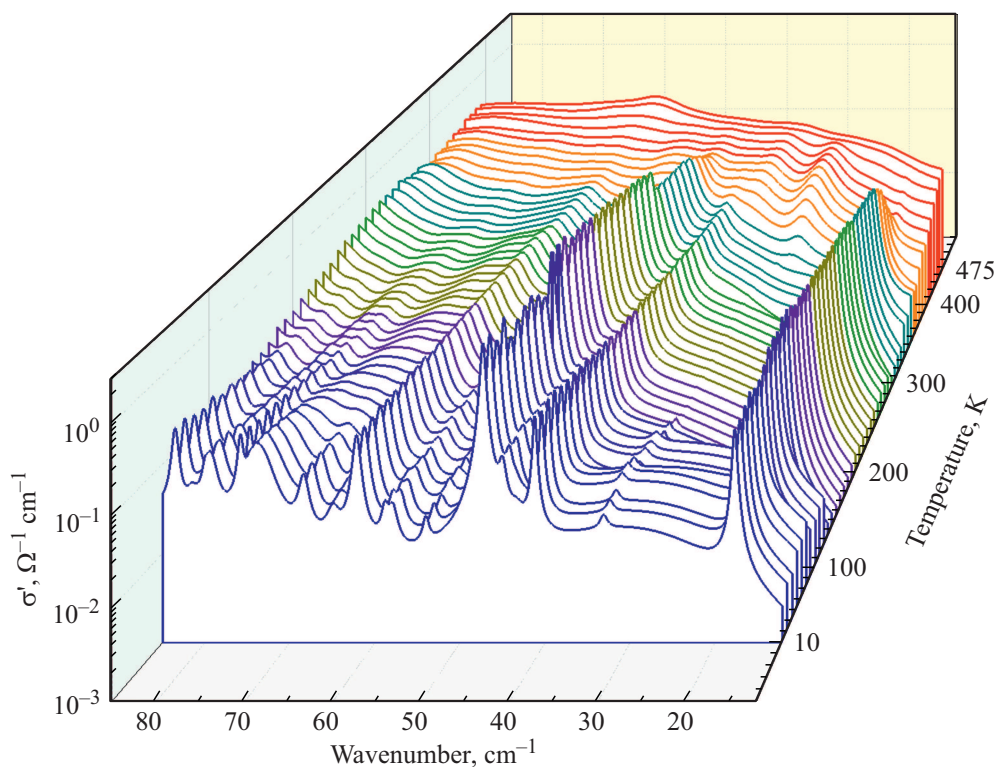


Рис. 4. Температурная эволюция диэлектрического отклика α -LM в виде спектров динамической проводимости $\sigma(\nu)$.

Общий вид спектров комплексной диэлектрической проницаемости приведен на рис. 3. Отметим, что ниже 10 cm^{-1} спектр мнимой части, полученный по измеренным спектрам пропускания и фазы, растет с понижением частоты. Общая тенденция роста показана для наглядности штриховой линией. Такой тип дисперсии может быть связан с высокочастотным крылом контура релаксации. Для проверки мы провели измерения на этих частотах с применением спектрометра на базе

ламп обратной волны. Для этого мы изготовили образец толщиной 3.5 mm , при которой точность определения мнимой части диэлектрической проницаемости обеспечивает получение достоверных результатов.

Как видно из данных измерений с помощью ЛОВ, рост функции $\varepsilon''(\nu)$ не наблюдается, хотя реально измеренные диэлектрические потери на порядок больше ожидаемых из моделирования классическим осциллятором. Этот результат можно считать методическим, поскольку

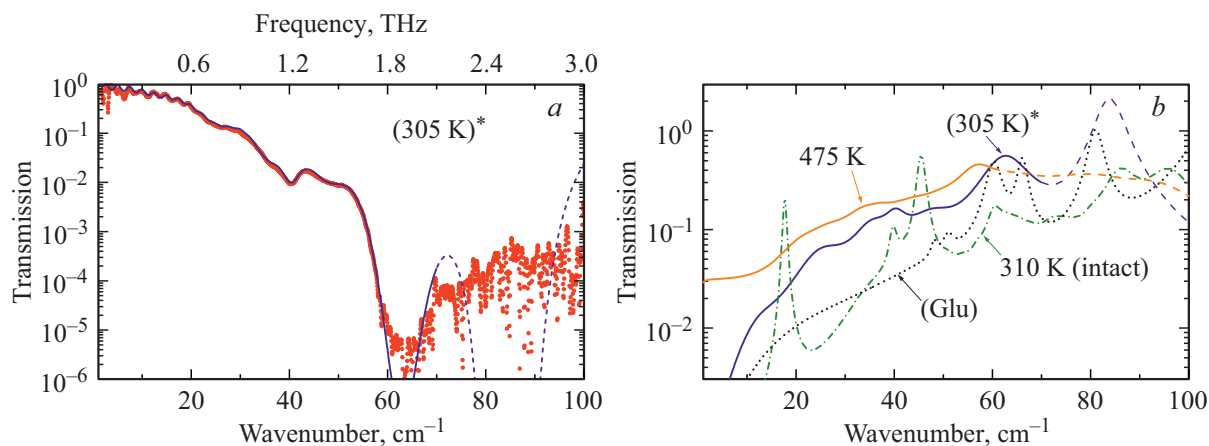


Рис. 5. (а) Спектр пропускания α -LM после охлаждения от максимальной температуры нагрева. Точки — эксперимент, сплошная линия — моделирование, пунктирная линия — дисперсия коэффициента пропускания, смоделированная осциллятором в области низкой достоверности данных. (б) Сопоставление спектров оптической проводимости исходного образца (α -LM) до нагрева 310 К (штрихпунктирная линия), для максимально нагретого образца $T = 475$ К и после его охлаждения до температуры 305 К — сплошная линия отмечена (305 К)*. Точками показан спектр глюкозы (Glu) при $T = 300$ К.

он определяет низкочастотную границу применимости данного метода ТГц импульсной спектроскопии для численного анализа результатов. С учетом всех особенностей схемы измерения [27,28] следует ограничиться частотой около 10 cm^{-1} (300 GHz), ниже которой возможны существенные ошибки в установлении характера диэлектрической дисперсии вещества.

Нагрев образца приводит не только к количественным, но и к качественным изменениям в спектрах, что указывает на происходящие в нем структурные изменения. Для спектра, измеренного при температуре 400 К, зарегистрированы линии в области $30\text{--}40 \text{ cm}^{-1}$, не характерные для α -LM. Можно предположить, что появление этих линий связано с дегидратацией образца и образованием безводной формы β -лактозы [20]. Температура плавления лактозы составляет 202.8°C (476 К). Наши измерения проведены в диапазоне до 475 К, что немного ниже температуры плавления. Спектр пропускания для максимальной температуры лишен каких-либо резонансных особенностей, но имеет широкие диффузные полосы. Важным результатом измерений является сохранение слабо выраженной интерференционной картины на низких частотах. Это свидетельствует о том, что образец находится в твердой фазе, его форма — плоскопараллельная пластина — практически не искажена, при этом на низких частотах не появилось значительного поглощения.

Общий вид температурной эволюции диэлектрического отклика представлен в виде спектров действительной части динамической проводимости $\sigma'(\nu) = 2\pi\nu\varepsilon_0\varepsilon''(\nu)$, где $\varepsilon_0 = 8.854 \cdot 10^{-12} \text{ F/m}$ — электрическая постоянная. На рис. 4 прослеживаются основные изменения в ТГц диэлектрическом отклике α -LM во всем температурном диапазоне существования твердого образца. При криогенных температурах две полосы выше 60 cm^{-1} разделяются на высокочастотные линии; более того, проявляют-

ся линии в областях 30 и $50\text{--}55 \text{ cm}^{-1}$. Слабый резонанс около 30 cm^{-1} может быть связан с малым содержанием α -формы лактозы. В области температур $350\text{--}450$ К этот пик заметно увеличивается и уширяется. Однозначно идентифицировать линии поглощения в области $50\text{--}55 \text{ cm}^{-1}$ сложно. Кардинальные изменения спектров вблизи температуры плавления $460\text{--}475$ К могут быть связаны, с одной стороны, с ростом квазирелаксационных процессов и ростом констант затухания вблизи температуры фазового перехода и, с другой стороны, со структурными изменениями на молекулярном уровне.

Спектры пропускания образца после его охлаждения в вакуумной камере показаны точками на рис. 5, а. Модельный спектр пропускания на этом же графике показан сплошной линией, при этом достоверный расчет ограничен диапазоном $10\text{--}65 \text{ cm}^{-1}$. Для того чтобы получить правильное описание дисперсии в области ниже 65 cm^{-1} , мы использовали при моделировании дополнительный осциллятор, показанный пунктирной линией. Очевидно наличие полосы поглощения в области $60\text{--}65 \text{ cm}^{-1}$, однако ее параметры можно оценить, учитывая только дисперсию низкочастотного крыла контура поглощения, причем с невысокой точностью. На более высоких частотах образец остается непрозрачным. На рис. 5, б сплошной толстой линией показан спектр оптической проводимости. Для сравнения приведены спектр для температуры 310 К до отжига, показанный штрихпунктирной линией, и спектр при максимальной температуре (тонкая сплошная линия).

Из полученных спектров очевидно, что в процессе нагрева в образце произошли необратимые структурные изменения. Для того чтобы выяснить, связаны ли они с разделением лактозы на моносахариды, проведены аналогичные измерения образца глюкозы. В спектре глюкозы, показанном на рис. 5, б точками, зарегистрированы дублеты в области 50 и $60\text{--}70 \text{ cm}^{-1}$. Эти линии

были идентифицированы при комнатной температуре для D- и L-форм глюкозы в работе [29].

Спектр охлажденного образца не содержит особенностей, присущих отклику глюкозы. Он характеризуется существенно большим поглощением и размытостью полос. Такой тип диэлектрического отклика характерен для разупорядоченных систем. В них за счет структурного беспорядка времена жизни колебаний существенно уменьшаются, что соответствует росту констант затухания. Вторым аргументом в пользу сильного разупорядочения стал широкий квазирелаксационный фон. Таким образом, нагрев α -LM привел к необратимым изменениям структуры, происшедшим до плавления образца.

Заключение

Выполнены измерения спектров диэлектрического отклика α -LM в ТГц области спектра в широком диапазоне температур. Показано, что полосы поглощения выше 50 cm^{-1} формируются перекрывающимися линиями температурно уширенных резонансов и могут быть разрешены при низких температурах. Собственные частоты всех этих полос демонстрируют заметно выраженную температурную зависимость. Важным фактором является необратимое исчезновение характерных полос при температурах выше $\sim 400 \text{ K}$, что указывает на структурные изменения в образце. Таким образом, можно утверждать, что устойчивость α -LM ограничена температурой порядка 400 K , что ниже температуры плавления образца.

Финансирование работы

Анализ температурных зависимостей диэлектрического отклика поддержан РФФ 18-12-00328. Проведение измерений поддержано РФФИ № 19-32-50075 мол_нр.

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Список литературы

- [1] Shen Y-Ch., Taday P.F. // IEEE J. Selected Topics in Quantum Electronics. 2008. V. 14. N 2. P. 407. doi 10.1109/JSTQE.2007.911309
- [2] Taday P.F., Bradley I.V., Arnone D.D., Pepper M. // J. Pharmaceutical Sciences. 2003. V. 92. N 4. P. 831. doi 10.1002/jps.10358
- [3] Smolyanskaya O.A., Chernomyrdin N.V., Konovko A.A., Zaytsev K.I., Ozheredov I.A., Cherkasova O.P., Nazarov M.M., Guillet J.-P., Kozlov S.A., Kistenev Yu.V., Coutaz J.-L., Mounaix P., Vaks V.L., Son J.-H., Cheon H., Wallace V.P., Feldman Yu., Popov I., Yaroslavsky A.N., Shkurinov A.P., Tuchina V.V. // Progress in Quantum Electronics. 2018. V. 62. P. 1. doi 10.1016/j.pquantelec.2018.10.001
- [4] Zaytsev K.I., Dolganova I.N., Chernomyrdin N.V., Katyba G.M., Gavdush A.A., Cherkasova O.P., Komandin G.A., Shchedrina M.A., Khodan A.N., Ponomarev D.S., Reshetov I.V., Karasik V.E., Skorobogatiy M., Kurlov V.N., Tuchin V.V. // J. Optics. 2020. V. 22. N 1. P. 013001. doi 10.1088/2040-8986/ab4dc3
- [5] Lavrukhin D.V., Yachmenev A.E., Pavlov A.Yu., Khabibullin R.A., Goncharov Yu.G., Spektor I.E., Komandin G.A., Yurchenko S.O., Chernomyrdin N.V., Zaytsev K.I., Ponomarev D.S. // Semiconductor Science & Technology. 2019. V. 34. P. 034005. doi 10.1088/1361-6641/aaff31
- [6] Komandin G., Anzin V., Ulitko V., Gavdush A., Mukhin A., Goncharov Y., Porodinkov O., Spektor I. // Optical Engineering. 2019. V. 59. N 6. P. 061603. doi 10.1117/1.OE.59.6.061603
- [7] Zeidler J.A., Taday P.F., Newnham D.A., Pepper M., Gordon K.C., Rades T. // J. Pharmacy and Pharmacology. 2007. V. 59. N 2. P. 209. doi 10.1211/jpp.59.2.0008
- [8] Markl D., Ruggiero M.T., Zeidler J.A. // European Pharmaceutical Review. 2016. V. 21. N 4. P. 45.
- [9] Musina G., Dolganova I., Malakhov K., Gavdush A., Chernomyrdin N., Tuchina D., Komandin G., Chuchupal S., Cherkasova O., Zaytsev K., Tuchin V. // Proceedings of SPIE. Berlin, Germany, 2018. V. 10800. P. 108000F. doi 10.1117/12.2324473
- [10] Musina G.R., Gavdush A.A., Tuchina D.K., Dolganova I.N., Komandin G.A., Chuchupal S.V., Smolyanskaya O.A., Cherkasova O.P., Zaytsev K.I., Tuchin V.V. // Proceedings of SPIE. Berlin, Germany, 2019. V. 11065. P. 110651Z. doi 10.1117/12.2526168
- [11] Zeidler J.A., Kogermann K., Rantanen J., Rades T., Taday P.F., Pepper M., Aaltonen J., Strachan C.J. // Int. J. Pharmaceutics. 2007. V. 334. P. 78. doi 10.1016/j.ijpharm.2006.10.027
- [12] Parimaladevi P., Srinivasan K. // Int. Dairy J. 2014. V. 39. P. 301. doi 10.1016/j.idairyj.2014.08.007
- [13] Brown E.R., Zhang W.-D. The Critical Effect of Hydration on the Resonant Signatures of THz Biospectroscopy. [Электронный ресурс] Режим доступа: <https://arxiv.org/abs/1810.08877>
- [14] Lowe E.K., Paterson A.H.J. // J. Food Engineering. 1998. V. 38. P. 15. doi 10.1016/S0260-8774(98)00109-5
- [15] Komandin G.A., Nozdin V.S., Gavdush A.A., Pronin A.A., Porodinkov O.E., Spektor I.E., Sigaev V.N., Mikhailov A.A., Shakhgildyan G.Yu., Ulitko V.E., Abdullaev D.A. // J. Appl. Phys. 2019. V. 126. P. 224303. doi 10.1063/1.5116790
- [16] Yan S., Zhang H., Yang Z., Tang M., Zhang M., Du C., Cui H.-L., Wei D. // RCS Adv. 2017. V. 7. N 66. P. 41667. doi 10.1039/c7ra07118c
- [17] Walter M., Plochocka P., Fisher B., Helm H., Uhd-Jepsen P. // Biopolymers (Biospectroscopy). 2002. V. 67. P. 310. doi 10.1002/bip.10106
- [18] Beevers E.A., Hansen H.N. // Acta Crystallographica. Section B. 1971. V. 27. P. 1323. doi 10.1107/S0567740871003947
- [19] Noordik J.N., Beurskens P.T., Bennema P., Visser R.A., Gould R.O. // Zeitschrift für Kristallographie. 1984. V. 168. N 1–4. P. 59. doi 10.1524/zkri.1984.168.14.59
- [20] Yamauchi S., Hatakeyama S., Imai Y., Tonouchi M. // American J. Analytical Chemistry. 2013. V. 4. N 12. P. 756. doi 10.4236/ajac.2013.412092
- [21] Saito S., Inerbaev T.M., Mizuseki H., Igarashi N., Note R., Kawazoe Y. // Japan. J. Applied Physics. 2006. V. 45. N. 43. P. L1156. doi 10.1143/JJAP.45.L1156

- [22] Komandin G.A., Gavdush A.A., Goncharov Yu.G., Porodinkov O.E., Nozdrin V.S., Chuchupal S.V., Spektor I.E. // *Opt. Spectrosc.* 2019. V. 126. N 5. P. 514.
doi 10.1134/S0030400X1905014X
- [23] Komandin G.A., Chuchupal S.V., Lebedev S.P., Goncharov Yu.G., Korolev A.F., Porodinkov O.E., Spektor I.E., Volkov A.A. // *IEEE Transaction on Terahertz Science & Technology.* 2013. V. 3. N. 4. P. 440.
doi 10.1109/TTHZ.2013.2255914
- [24] Shen Y-C., Taday P.F. // *IEEE J. Selected Topics in Quantum Electronics.* 2008. V. 14. N 2. P. 407.
doi 10.1109/JSTQE.2007.911309
- [25] Roggenbuck A., Schmitz H., Deninger A., CamaraMayorga I., Hemberger J., Güsten G., Grüninger M. // *New J. Physics.* 2010. V. 12. P. 043017. doi 10.1088/1367-2630/12/4/043017
- [26] Barker A.S., Hopfield J.J. // *Phys. Rev.* 1964. V. 135. P. A1732.
doi 10.1103/PhysRev.135.A1732
- [27] Guliano B.M., Gavdush A.A., Muller B., Zaitsev K.I., Gassi T., Palumbo M.E., Baratta G.A., Scire S., Komandin G.A., Yurchenko S.O., Casseli P. // *Astronomy & Astrophysics.* 2019. V. 629. P. A112. doi 10.1051/0004-6361/201935619
- [28] Gavdush A.A., Chernomyrdin N.V., Malakhov K.M., Beshplav S.-I.T., Dolganova I.N., Kosyrkova A.V., Nikitin P.V., Musina G.R., Katyba G.M., Reshetov I.V., Cherkasova O.P., Komandin G.A., Karasik V.E., Potapov A.A., Tuchin V.V., Zaytsev K.I. // *J. Biomedical Optics.* 2019. V. 24. N. 2. P. 027001. doi 10.1117/1.JBO.24.2.027001
- [29] Upadhyya P.C., Shen Y.C., Davies A.G., Linfield E.H. // *J. Biological Physics.* 2003. V. 29. N 2–3. P. 117.
doi 10.1023/A:1024476322147