

Определение и идентификация параметров конденсированных сред методом исследования в СВЧ-диапазоне

© Р.Ю. Герасимов¹, В.Н. Бовенко¹, М.Ю. Герасимов²

¹МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, 105005, Россия

²Институт машиностроения им. А.А. Благонравова, Москва, 101990, Россия

Приведены результаты экспериментальных и теоретических исследований взаимодействия радиоволн в диапазоне частот 2,0...4,2 ГГц с частицами порошков карбида кремния и водными растворами NaCl и LiCl. Экспериментально установлено изменение формы регистрируемых сигналов и смещение спектра в стоковую область частот при увеличении размеров микрочастиц. Исследованы амплитудно-частотные характеристики спектров сигналов. Высокая точность определения частоты 10^{-9} ... 10^{-10} позволила достичь чувствительности смещения спектра частот (5...6) 10^9 Гц/м.

Ключевые слова: радиоволны, спектр, конденсированная среда, полимодальное распределение, фрактал, скейлинг.

Введение. Метод исследования в СВЧ-диапазоне предназначен для решения задач идентификации, дефектоскопии и дефектометрии в сложных системах, конструкциях и многослойных материалах. Метод основан на регистрации сканирующим широкополосным приемником спектров радиоволновых излучений, возникающих вследствие возбуждения переменных высокочастотных токов смещения и проводимости в объекте исследования или в его отдельных элементах, помещенных между гибкими обкладками емкостного рабочего датчика, и последующем анализе получаемых спектров на аппаратно-программном комплексе (АПК).

Установка (рис. 1) работает следующим образом: на объект исследования 1 устанавливают электрическую емкость 2, которая вместе с генератором переменного высокочастотного напряжения 3 составляет электромагнитный колебательный контур. Затем подают переменное высокочастотное напряжение, фиксируют изменение частоты электромагнитной волны радиоволнового диапазона приемной антенной, связанной со сканирующим устройством 4, и обрабатывают сигнал со сканирующего устройства на персональном компьютере 5 путем сравнения сигнала от объекта исследования с типовыми сигналами.

Поставленная техническая задача достигается за счет того, что в исследуемом объекте возбуждают электромагнитное поле внешним электромагнитным излучением, в результате возникают макроток и характерные для емкостного элемента токи смещения. Облучение осуществляется с помощью двух проводящих гибких пластин через две диэлектрические пластины, исполняющие роль своеобразного

конденсатора, между которыми установлен исследуемый объект. Причем данные пластины определенным образом размещены по контуру исследуемого объекта, поэтому поле, излучаемое объектом, а следовательно, и его спектральные характеристики, становятся объектно-ориентированными, т. е. сам объект становится излучателем электромагнитных волн. Для позиционирования неоднородностей и деталей исследуемых объектов пластины выполняют из набора отдельных элементов. С целью сканирования неоднородностей и распределения сигналов по этим элементам используют сканирующее устройство, управляемое с помощью АПК. Наличие двух диэлектрических пластин, через которые индуцируется в контролируемом объекте электромагнитное поле, позволяет снизить до минимума отражения от их внешних поверхностей и, соответственно, уровень возбуждения поверхностных волн, что обеспечивает повышение разрешающей способности.

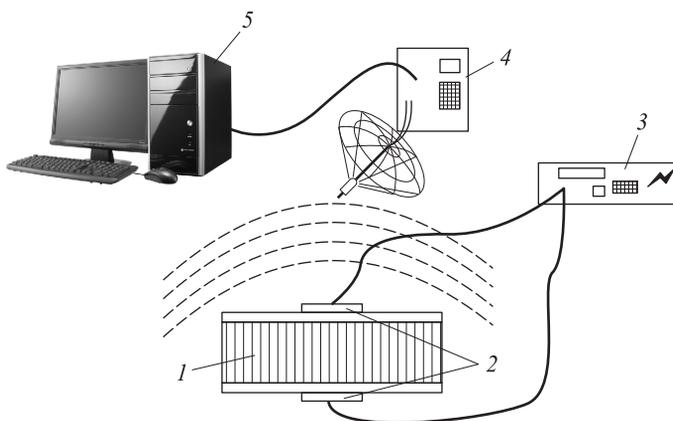


Рис. 1. Схема экспериментальной установки:

1 – объект исследования; 2 – обкладки емкостного рабочего датчика; 3 – генератор высокочастотного напряжения; 4 – сканирующий приемник; 5 – персональный компьютер

Теоретический анализ. В работах [1, 2] показано, что формирование и развитие иерархии размеров частиц при измельчении можно описать с помощью итерационного процесса. Его математическое выражение базируется на том, что характерные линейные размеры частиц d_k и любых структурных изменений и связанных с ними длин волн λ_k индуцированного акустического излучения являются членами геометрической прогрессии [1]:

$$d_k = 2\pi \langle a \rangle B_\lambda^k, \quad \lambda_k = 2\pi \langle a \rangle B_\lambda^{k+1}, \quad B_\lambda = \lambda_B / \langle a \rangle, \quad (1)$$

где $k = 0, 1, 2, \dots$ – номер уровня фрактального размера частицы; $\langle a \rangle$ – среднее кратчайшее расстояние между атомами; λ_B – наименьшая

длина акустической волны в твердом теле, возникающая при разрыве межатомных связей; B_λ – знаменатель прогрессии, совпадающий по физическому смыслу с дискретно-волновым критерием микроразрушения.

Для большинства твердых тел B_λ находится в сравнительно узком интервале значений от 2,1 для одномерного и до 3,1 для трехмерного кристаллов, среднее значение $B_\lambda = 2,6$. Как показано в работах [3, 4], волновой критерий B_λ является фрактальной размерностью.

В отличие от обычно принятой математической интерпретации фрактальной размерности D в данном случае $B_\lambda = D$ приобретает вполне определенный физический смысл.

Отношение $\langle a \rangle / \lambda_B$ связано с Δ_P – безразмерным параметром, выполняющим роль масштабной инвариантности, следующей зависимостью:

$$\langle a \rangle / \lambda_B = (h / \lambda_B) / (h / \langle a \rangle) = P / P_{\max} = \Delta_P, \lambda_B \sim \lambda_B, \quad (2)$$

где h – постоянная Планка; P – импульс атома, полученный при разрыве межатомной связи (ему соответствует волна де Бройля λ_B , совпадающая по порядку значения с наименьшей длиной акустической волны в кристалле λ_B); $P_{\max} = h / \langle a \rangle$ – максимальный импульс частицы в пределах первой зоны Бриллюэна. Такое явление, когда пространственно-временные и энергетические спектры зависят от безразмерного параметра (в данном случае от $B_\lambda = 1 / \Delta_P$), называется масштабной инвариантностью или скейлингом [5].

Проверка выполнения законов полимодального распределения (1) и скейлинга (2) для процессов образования конденсированной фазы при полимеризации и кристаллизации различных веществ, распылении жидкостей и т. п. была проведена в работах [3, 5, 6]. На рис. 2 приведена типичная кривая распределения частиц по размерам для элементов структуры высокопрочной и радиационно стойкой пленки полимера. Распределение по размерам определяли методом хорд [2, 5, 7] при анализе электронных микрофотографий реплик с поверхности пленки, подвергнутой травлению в плазме высокочастотного кислородного разряда. Погрешность определения размеров не превышала 5 % при объеме выборки 500 частиц. Отмечается полимодальное распределение в интервале от 8 до 600 нм с пятью максимумами, соответствующими наиболее вероятным размерам: 11, 27, 72, 195 и 490 нм. При этом в указанной последовательности размеров отношение следующего преимущественного размера к предыдущему сохраняется равным среднему значению дискретно-волнового критерия микроразрушения B_λ : $d_{k+1}/d_k = 2,6 \pm 0,3$. Анализ показал, что полимодальный характер распределения частиц по размерам (1) широко распространен в природе и его выполнение удастся проследить в

диапазоне пространственных масштабов 15 порядков ($10^{-10} \dots 10^5$ м) [1–3, 5, 8].

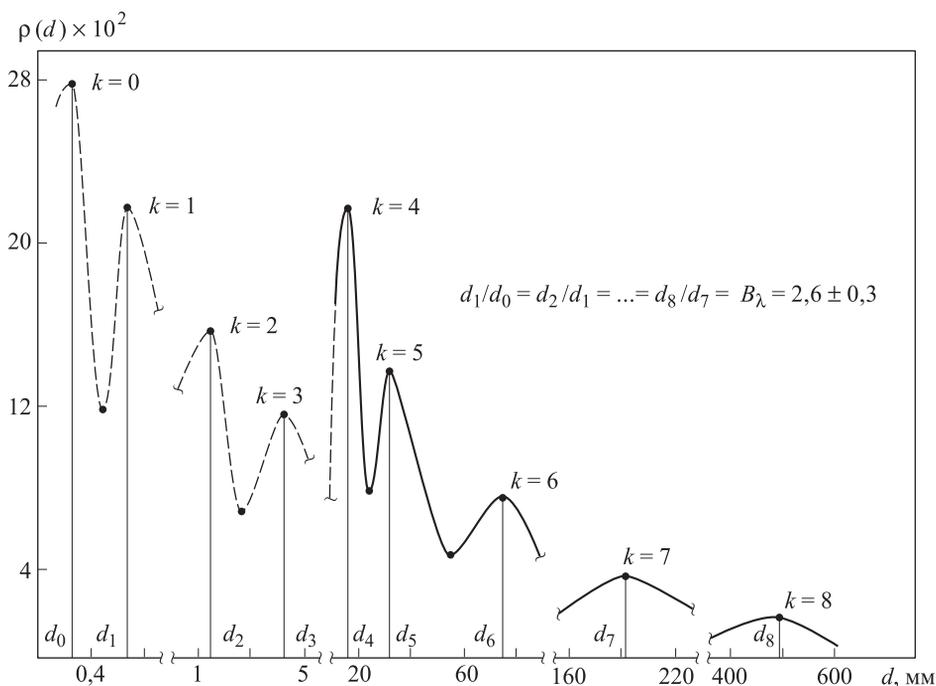


Рис. 2. Закон полимодального распределения частиц по размерам для элементов структуры термостойкого аморфного полимера (полиимидной пленки толщиной 60 мкм, полученной путем ступенчатой температурно-временной циклизации полиамидокислоты при температуре 353, 403, 448, 473 и 498 К) [6]

Таким образом, подтвержден вывод о том, что свойство дискретности и самоподобия в процессах разрушения и образования конденсированной фазы в области микро- и наноразмеров проявляется в кратности размеров образующихся частиц критерию инвариантности B_λ или обратной ему величине $\Delta\rho$. Общий характер процессов разрушения и образования конденсированных фаз приводит к выводу о единых причинах синергетической (согласованной и кооперативной) обусловленности их характеристик как на атомном, так и на микро- и макрокопическом уровнях.

Можно было ожидать проявления свойства дискретности и масштабной инвариантности при взаимодействии электромагнитного излучения с микрочастицами высокодисперсных порошков и водных растворов солей. Наиболее близкими в этом плане оказались исследования по оптике глобулярных кристаллов – новых физических объектов, обладающих кристаллической структурой с периодом решетки, существенно превышающим атомные размеры [9]. Так, в работе [10]

обнаружено явление спонтанного глобулярного рассеяния света в синтетических опалах с диаметром глобул от 204 до 340 нм при непрерывном возбуждении излучением аргонового лазера с длиной волны генерации 514,5 нм. В этом случае смещение частоты наблюдалось в акустической области спектра в диапазоне $7 \cdot 10^9 \dots 2,7 \cdot 10^{10}$ Гц. Анализ результатов этих экспериментов проведен в работе [9] с использованием теории Лэмба о возбуждении резонаторных мод в однородной упругой глобуле со свободной поверхностью.

Диспергированные продукты являются сыпучими средами (*granular mediums*), динамика которых в значительной степени отличается от динамики фотонных кристаллов. Однако для отдельно взятой гранулы выполняются основные положения теории Лэмба, поэтому с учетом закона о распределении частиц по размерам (1), резонаторные моды, соответствующие k -му уровню фрактального размера частиц конденсированной среды, находят по следующим формулам:

$$v_k = s_k / \lambda_k, \lambda_k = 2\pi \langle a \rangle B_\lambda^{k+1}, k = 0, 1, 2, \dots, \quad (3)$$

где s_k – среднее значение скорости звука для k -го уровня фрактального размера частиц в конденсированной среде.

Проведенные оценки показали зависимость спектральных характеристик спонтанного рассеяния радиоволн от преимущественных размеров микрочастиц. Важной особенностью процесса формирования сигналов электромагнитных волн является смещение спектра сигналов в стоксову область частот. При этом чувствительность метода к смещению частот возрастает по мере уменьшения кратности B_λ . Другой особенностью процесса является интерференция рассеянных радиоволн, интенсивность которых и суммарное сечение рассеяния пропорциональны квадрату числа атомов в частице. Однако для достоверного подтверждения возможности этих эффектов помимо расчетных оценок необходимы экспериментальные измерения изменений параметров спектров вторичного излучения при различных размерах микрочастиц конденсированной среды.

Экспериментальные результаты и их обсуждение. Исследования проводились на установке, описание которой приведено в работах [10–13]. В качестве исследуемых образцов использовали порошки тонкого измельчения, полученные в процессе диспергирования различных материалов во встречных пучках газоструйной мельницы [2], в которой относительная скорость соударения частиц достигала удвоенной скорости звука в воздухе. Разрушение исходных материала в газоструйной мельнице происходит практически хрупким образом, так как время взаимодействия частиц при их соударении составляет $10^{-10} \dots 10^{-9}$ с в микронной области размеров частиц и уменьша-

ется до $10^{-12} \dots 10^{-13}$ с в области наноразмеров. Таким образом, струйная мельница представляет собой необратимую термодинамическую машину квазихрупкого разрушения, которая трансформирует энергию налетающих частиц в энергию акустического излучения и в кинетическую и поверхностную энергии разлетающихся частиц. При этом КПД такой машины равен квантовому КПД. АЭ [1, 3, 12, 13]:

$$\eta_{\text{кв}} = (P_{\text{max}} c) / U = (hc/a) / U = hv_m / U = 10^{-2} \dots 10^{-3}, \quad (4)$$

где P_{max} – максимальная энергия фонона; c – скорость звука; U – энергия межатомной связи; v_m – максимальная частота колебаний атомов в акустической волне.

Следует отметить, что при субмикроскопическом измельчении возникают серьезные проблемы, связанные с преодолением, с одной стороны, так называемого микронного барьера крупности, когда затруднена классификация диспергированного продукта с размерами не более 1 мкм из-за отсутствия высокопроизводительных фильтров и экспрессных методов мониторинга, а с другой стороны, – с преодолением альтернативного процесса агломерации (слипания микрочастиц), интенсивность которого возрастает с увеличением поверхностной активации частиц. Примечательно, что для решения обеих проблем необходимы экспрессные методы определения размеров частиц. Исходя из изложенного выше в экспериментах использовали пробы порошков разных материалов (карбида бора, диоксида титана, карбида кремния, цемента, глинозема и др.), преимущественные размеры частиц которых превышали микрометры.

Облучение проб проводили в интервале частот 2,0...4,2 ГГц. На рис. 3 приведены спектры сигналов при непрерывном облучении проб микропорошков карбида кремния различных размеров на частоте $\nu = 2,4$ ГГц. Видно, что возбуждение резонатора происходило в областях частот 2445,72...2453,64, 2454,80...2457,60 и 2461,56...2463,76 МГц. Во всех случаях при внесении в резонатор проб порошков наблюдались изменения формы спектров. Следует отметить общую тенденцию: по мере увеличения размеров частиц порошка происходит смещение полосы спектра в стоксову область частот и одновременно с этим увеличение амплитуды регистрируемых сигналов.

Результаты обработки экспериментальных данных, полученные методом определения координат центра тяжести спектральных характеристик, ограничивающих площади плоских фигур (см. рис. 3), приведены на рис. 4, где по оси абсцисс отложены размеры частиц исследуемых порошков d_k , а по оси ординат – средние значения частот ν и амплитуд A , которые были найдены по формулам [14]:

$$x_c = \sum(x_i * y_i) / \sum y_i; y_c = \sum(x_i * y_i) / \sum x_i \quad (x_c = \nu, y_c = A). \quad (5)$$

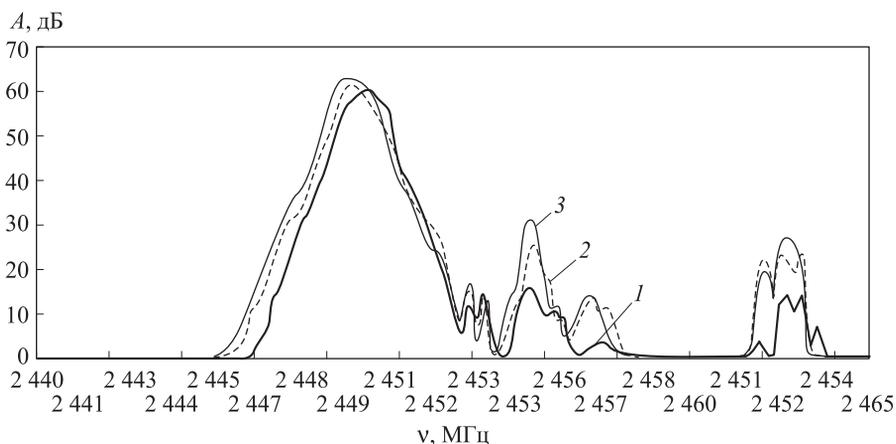


Рис. 3. Спектральные характеристики излучения проб порошков карбида кремния с преимущественными размерами частиц 4...5 (1), 20...28 (2) и 50...63 (3) мкм при их возбуждении в емкостном резонаторе на частоте $\nu = 2,4$ ГГц

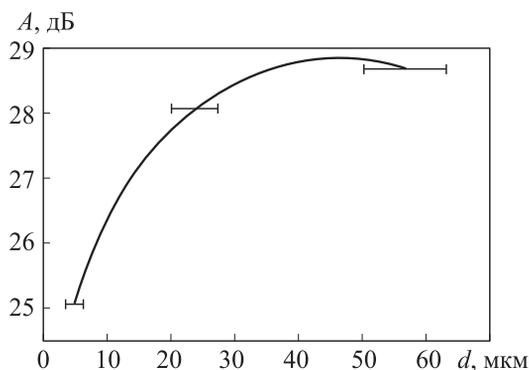


Рис. 4. Зависимость средних значений амплитуды сигналов от преимущественных размеров частиц карбида кремния при возбуждении на частоте $\nu = 2,4 \cdot 10^9$ Гц

Среднее значение амплитуды радиосигналов (см. рис. 4) возрастает с увеличением преимущественных размеров микрочастиц. Из теоретических соображений следует, что кривая зависимости интенсивности рассеянного излучения от размера частиц порошка должна иметь вид, представленный на рис. 5, где выделены три характерные области формирования спектра сигналов: область 1, в которой интенсивность рассеянного излучения единицей объема пропорциональна третьей степени размера частицы ($I_S \sim \Sigma \sim d^3$); область 3, в которой удельная интенсивность обратно пропорциональна размеру частицы ($I_S \sim \Sigma \sim 1/d$), и переходная область 2 между областями 1 и 3. Такой характер зависимости удельной эффективности рассеяния от размера частиц среды можно объяснить следующим образом. Пока размер микрочастицы d меньше длины радиоволны λ , все рассеивающие

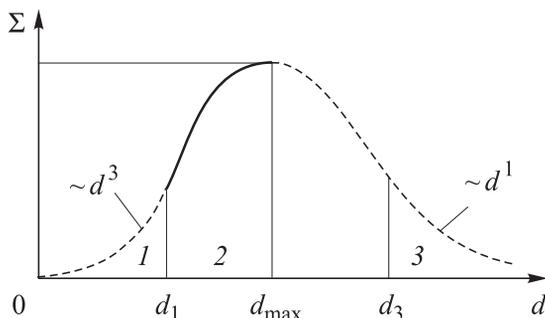


Рис. 5. Схематическая иллюстрация зависимости суммарного значения «эффективного сечения» рассеяния (и поглощения) единицей объема от размера частиц порошка (штриховая кривая соответствует теоретическим оценкам, сплошная – экспериментальным данным)

атомы частиц излучают электромагнитные волны с близкими фазами. В этом случае интенсивность рассеянного излучения I и «эффективное сечение» рассеяния (и поглощения) σ , как известно, пропорциональны N^2 (N – число атомов в частице), а N , в свою очередь, пропорционально d^3 . Тогда суммарное сечение рассеяния (и поглощения) единицей объема $\Sigma = \sigma n$ (n – число частиц в единице объема). Поскольку $n \sim 1/d^3$, получаем

$$I \sim \sigma \sim N^2 \sim d^6, I_S \sim \Sigma = \sigma n \sim d^3. \quad (6)$$

Отсюда следует, что в области I удельная интенсивность излучения $I_S \sim d^3$, а амплитуда сигналов $A \sim d^{3/2}$. С учетом фрактальной размерности частиц порошка эта зависимость может быть еще более слабой ($A \ll d^{3/2}$). При $d > \lambda$ ситуация изменяется: в процессах поглощения и рассеяния принимают участие только атомы, расположенные на поверхности частиц. В этом случае суммарное «эффективное сечение» поглощения и рассеяния примерно равно поперечному сечению частицы, т. е. $\sigma \sim d^2$, а $\sigma n \sim 1/d$. Поэтому эффективность рассеяния единицей объема достигает максимума при d_{\max} .

Таким образом, при размерах частиц, меньших λ , формирование спектра сигналов в СВЧ-диапазоне обусловлено эффектами усиливающейся интерференции при увеличении размеров частиц. Отметим, что термин «усиливающаяся интерференция» был введен Р. Фейнманом при рассмотрении рассеяния света на микрочастицах конденсированного вещества, представляющих собой большое скопление атомов, например в виде капелек жидкости, которые возникают в атмосфере за счет конденсации [15].

На рис. 6 представлена линейная зависимость средних частот спектра сигналов, полученных в результате расчетов по формуле (5), от преимущественных размеров частиц. Это позволяет найти среднее

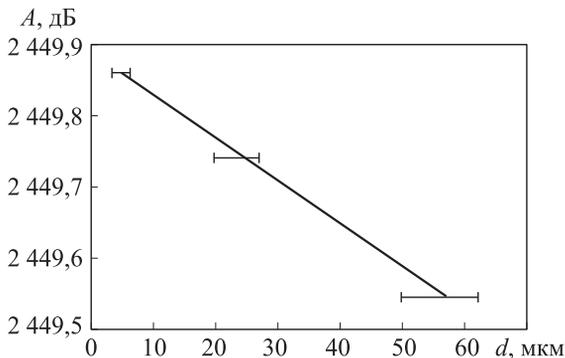


Рис. 6. Зависимость средней частоты спектра сигналов от преимущественных размеров частиц карбида кремния

значение чувствительности смещения частоты спектра по отношению к изменению размеров частиц: $\delta_\nu = \Delta\nu / \Delta d = (6,0 \pm \pm 1,2)10^9$ Гц/м = $6,0 \pm 1,2$ Гц/нм, $\varepsilon = 20$ %. Такая относительная погрешность определения $\delta_\nu = \Delta\nu / \Delta d$ обусловлена большим разбросом значений Δd при современных методах гранулометрического анализа. Тем не менее чувствительность радиоволнового метода при определении изменения размеров частиц конденсированной среды остается достаточно высокой. Кроме того, открывается возможность проводить оценку скорости распространения акустических возбуждений в таких средах. Действительно, исходя из формулы (3) найдено аналитическое выражение чувствительности смещения частоты спектра в следующем виде:

$$\Delta_\nu = \Delta\nu / \Delta d = s_k / (2\pi \langle a \rangle B_\lambda^{k+1})^2, \quad (7)$$

откуда

$$s_k = (2\pi \langle a \rangle B_\lambda^{k+1})^2 \delta_\nu. \quad (8)$$

Подставив $\langle a \rangle = 3 \cdot 10^{-10}$ м, $B_\lambda = 2,6$, $\Delta_\nu = 6 \cdot 10^9$ Гц/м и $k = 10, 11$, определим значения скорости звука $s_{10} = 24$ м/с и $s_{11} = 150$ м/с, которые примерно на один-два порядка меньше продольной и поперечной скоростей звука в фотонных кристаллах.

Важной особенностью данного метода является возможность его применения для определения концентраций примесей солей и размеров их частиц в растворах. Для примера на рис. 7 приведены спектральные характеристики проб дистиллированной воды с примесями NaCl и LiCl. Из графиков на рис. 4–6 можно сделать вывод, что при увеличении размеров частиц формирование спектра сигналов происходит в стоксовой области частот. Однако из теоретических соображений следует, что формирование спектральных характеристик сигналов при облучении в СВЧ-диапазоне может происходить и

в антистоксовой области частот, как например, при облучении фотонных кристаллов лазером [9], что составит предмет последующих исследований.

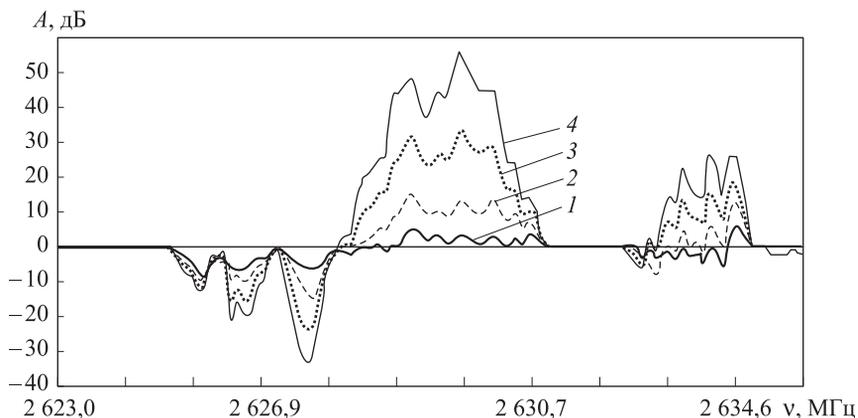


Рис. 7. Спектральные характеристики проб дистиллированной воды с примесями 10 % (1), 15 % (2) NaCl и 10 % (3), 15 % (4) LiCl при возбуждении в емкостном резонаторе в диапазоне частот 2625,24...2635,90 МГц

Закключение. Экспериментально установлено, что при облучении конденсированных сред в СВЧ-диапазоне происходит изменение формы регистрируемых сигналов и смещение спектра в стоксову область частот в результате усиливающейся интерференции. Анализ изменений амплитудно-частотных характеристик сигналов подтвердил предположение о возбуждении резонаторных мод Лэмба в частицах конденсированной среды, а также фрактальный закон о полимодальном распределении частиц по размерам со скейлингом $B_\lambda = 2,6$ и, кроме того, показал, что в исследуемых режимах облучения происходит возбуждение акустических волн как в сыпучей среде, так и в водных растворах NaCl и LiCl.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Бовенко В.Н. Теория акустической эмиссии в деформированных кристаллах. *Прогноз землетрясений*, 1984, № 1, с. 129–137.
- [2] Бовенко В.Н., Горобец Л.Ж. Дискретно-волновая природа диспергирования. *Науковий вісник НГУ*, 2008, № 1, с. 7–9.
- [3] Бовенко В.Н., Старцев В.М. Полимерные стекла: новые подходы к описанию и прогнозированию прочностных свойств. *Физика и химия стекла*, 1999, т. 25, № 1, с. 107–115.
- [4] Иванова В.С., Кузеев И.Р., Закирничная Н.М. *Синергетика и фракталы. Универсальность механического поведения материалов*. Уфа, Изд-во УГНТУ, 1998, 363 с.
- [5] Масштабная инвариантность (скейлинг). *Физика микромира. Маленькая энциклопедия*. Москва, Советская энциклопедия, 1980, с. 245–246.

- [6] Бовенко В.Н., Старцев В.М. Дискретно-волновая природа надмолекулярной организации аморфного полимера. *Высокомолекулярная химия*, 1994, т. 36, № 6, с. 1004–1008.
- [7] Бовенко В.Н., Герасимов Р.Ю. Формирование спектральных характеристик сигналов при облучении микропорошков в СВЧ-диапазоне. *Нелинейный мир*, 2011, № 6, т. 9, с. 369–377.
- [8] Ташколов И.Н., Садовский Б.Ф., Черняев Г.А. Свойство дискретности в процессах разрушения и образования конденсированной фазы. *Доклады АН РФ*, 1995, т. 344, № 4, с. 474–476.
- [9] Горелик В.С. Оптика глобулярных кристаллов. *Квантовая электроника*, 2007, т. 37, № 5, с. 409–432.
- [10] Kuok M.H., Lim H.S., Ng S.C., Liu N.N., Wang Z.K. Light Brillouin scattering in artificial opals. *Phys. Rev. Lett*, 2003, vol. 90, pp. 255–258.
- [11] Герасимов Р.Ю. Тезисы докладов Российской школы конференции с международным участием «Математика, информатика, их приложения и роль в образовании». Москва, РУДН, Типография РУДН, 2009, с. 114–118.
- [12] Герасимов Р.Ю., Фадеев Г.Н., Герасимов Ю.В. *Необратимые процессы в природе и технике*. Сб. науч. тр., вып. III. Москва, МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2010, с. 137–143.
- [13] Бовенко В.Н., Герасимов Р.Ю., Горобец Л.Ж. Радиоспектроскопия продуктов сверхтонкого измельчения. *Научная сессия НИЯУ МИФИ-2010. Аннотации докладов. В 3-х т. Т. 2. Нанозификация и нанотехнологии. Фундаментальные проблемы науки*. Москва, НИЯУ МИФИ, 2010, с. 73–74.
- [14] Выгодский М.Я. *Справочник по высшей математике*. Москва, Наука, 1977, 871 с.
- [15] Фейнман Р., Лейтон Р., Сэндс М. *Фейнмановские лекции по физике. Вып. 3. Излучение. Волны. Кванты*. Москва, УРСС, 2004. 240 с.

Статья поступила в редакцию 05.06.2013

Ссылку на эту статью просим оформлять следующим образом:

Герасимов Р.Ю., Бовенко В.Н., Герасимов М.Ю. Определение и идентификация параметров конденсированных сред методом исследования в СВЧ-диапазоне. *Инженерный журнал: наука и инновации*, 2013, вып. 8. URL: <http://engjournal.ru/catalog/fundamentals/physics/1111.html>

Герасимов Ростислав Юрьевич родился в 1983 г., окончил МГТУ им. Н.Э. Баумана в 2006 г. Сотрудник кафедр «Химия» и «Физика». Автор 10 научных работ в области определения и идентификации параметров материала. e-mail: r_guerassimov@mail.ru

Бовенко Вильям Николаевич родился в 1936 г., окончил МИФИ в 1960 г. Д-р физ.-мат. наук, профессор кафедры «Физика». Автор 90 научных и учебно-методических работ в области физики прочности и разрушения. e-mail: willian-2304@mail.ru

Герасимов Михаил Юрьевич родился в 1976 г., окончил МГТУ им. Н.Э. Баумана в 2000 г. Канд. техн. наук, старший научный сотрудник ИМАШ РАН им. А.А. Благонравова. Автор 40 научных работ в области прочности и разрушения. e-mail: guerassimov_m@mail.ru