

Формирование фотоакустического отклика в наноструктурированных композитных системах «пористая матрица - жидкость»

К.В. Войтенко¹, Д.А. Андрусенко¹, А.Ю. Пастушенко², Н.В. Исаев¹, А.Г. Кузьмич¹, Р.М. Бурбело¹

¹ Киевский национальный университет имени Тараса Шевченко, ул. Владимирская, 64/13, 01601 Киев, Украина

² University of Lyon, Nanotechnology Institute of Lyon, UMR CNRS 5270, INSA de Lyon, F69621, France

(Получено 16.05.2017; в отредактированной форме – 25.07.2017; опубликовано online 27.07.2017)

В работе представлены результаты экспериментальных исследований процессов формирования фотоакустического отклика в наноструктурированных композитных системах «пористая матрица - жидкость». Рассмотрены случаи низкочастотной периодической модуляции и импульсного лазерного возбуждения. Установлено, что в обоих случаях амплитуда фотоакустического отклика существенно возрастает с ростом пористости матрицы. Предложена упрощенная модель композитной системы на основе пористой матрицы, что позволило выполнить корректные (согласуются с экспериментом) оценки величин модулей Юнга и коэффициентов теплового расширения композитных систем разной пористости, а также величин амплитуды акустических откликов.

Ключевые слова: Фотоакустический отклик, Мезопористый кремний, Композитная система «пористая матрица – жидкость».

DOI: [10.21272/jnep.9\(4\).04021](https://doi.org/10.21272/jnep.9(4).04021)

PACS numbers: 81.05.Rm, 81.70.Cv

1. ВВЕДЕНИЕ

Открытие пористого кремния (ПК) [1], а также интенсивной фотолюминесценции в нем, повлекли за собой бурный прогресс в изучении наноструктурированных пористых полупроводников и композитных материалов на их основе. Результатом стал технологический прорыв в изготовлении наноматериалов самой разной морфологии, химического состава и свойств. В этой связи получил развитие и широкий спектр направлений практического применения наноструктурированных пористых полупроводников [2, 3].

Важное место, как в технологиях изготовления наноструктурированных пористых полупроводников, так и в их прикладном использовании, занимают наноструктурированные системы особого типа, а именно, композитные системы «пористый кремний - жидкость» (ПКЖ). Отдельно тут следует выделить биомедицинские применения ПК, где естественным является его существование в виде ПКЖ с водными растворами в порах. При этом ПК может быть (в зависимости от конкретных условий) как биосовместимым, так и биологически нейтральным, либо биоактивным [4-9]. Весьма неполный список включает тут средства целевой доставки лекарственных препаратов, импланты, биосенсоры, сенсоризаторы для тераностики [10], контейнеры для выращивания клеточных культур и многое другое [7-15]. В области тераностики широкие возможности открывает использование взаимодействия лазерного излучения с наночастицами, полученными при функционализации и наноструктурировании ПК. Это может быть использовано для диагностики и визуализации различных патологических образований [16]. Одним из способов формирования информационного сигнала здесь может служить фотоакустическое преобразование.

Ранее было показано [17, 18], что в процессах формирования фотоакустического (ФА) отклика в

композитных системах типа ПКЖ под воздействием модулированного оптического облучения, существенную роль могут играть термоиндуцированные давления (жидкости в порах. Определяющим здесь можно считать то, что энергопреобразование *излучение-нагрев-звук* обычно намного эффективнее происходит в жидкостях, чем в твердых телах. Причиной этого является то, что, как правило, коэффициенты теплового расширения жидкостей примерно на два (в некоторых случаях на три) порядка превосходят коэффициенты теплового расширения твердых тел. Коэффициенты же сжимаемости жидкостей и твердых тел отличаются не столь сильно. В результате, например, в мезопористом кремнии при быстром нагреве, когда характерные времена нагрева меньше времен релаксации процессов перетекания жидкости в порах, в последних возникают термоиндуцированные давления значительной величины [18]. Влияние этих давлений может приводить к многократному увеличению амплитуды ФА отклика, а также к появлению в нем информации, связанной с процессами перетекания жидкости в системе пор (значение вязкости, характерный диаметр пор) под действием термоиндуцированных давлений.

Однако, использование, предложенных в выше отмеченных работах, способов формирования ФА отклика, а также соответствующих математических моделей, представляется невозможным в большинстве приложений тераностики, где требования бесконтактности возбуждения и регистрации ФА отклика, а также достаточного разнесения в пространстве областей его формирования и регистрации ФА отклика, приводят к необходимости использовать импульсные лазерные источники излучения. Увеличение амплитуды отклика в этом случае является весьма важной задачей, поскольку ее решение позволяет как увеличить расстояние между областью наблюдения и сенсором, так и добиться улучшения соотношения сигнал/шум. В то же время, потенци-

альная возможность увеличения амплитуды акустического отклика при импульсном возбуждении, как результат заполнения пор твердотельной пористой матрицы жидкостью, остается практически не исследованной. Можно назвать лишь работы прикладного характера, где ПКЖ используют для формирования коротких звуковых импульсов вследствие поглощения импульсов оптического излучения длительностью в несколько наносекунд [19].

В данной работе проведен сравнительный анализ процессов формирования фотоакустического отклика в ПК при низкочастотной периодической модуляции интенсивности оптического излучения и при импульсном лазерном воздействии. Приведены результаты экспериментальных исследований формирования ФА отклика в мезопористых слоях ПК с жидкостью (ПКЖ) и без таковой в порах при разных значениях пористости матрицы.

2. ЭКСПЕРИМЕНТ

2.1 Низкочастотное возбуждение

Под низкочастотным возбуждением будем понимать возбуждение квазистатических механических колебаний в структуре образец-пьезопреобразователь модулированным потоком оптического излучения. Известно, что механические колебания можно считать квазистатическими, когда их частота как минимум на порядок меньше, чем частоты низших механических резонансов системы. В случае, когда экспериментальная структура является тонкой пластиной, таковыми являются частоты резонансов ее изгибных колебаний. Для типичной структуры, описанной в работе [20], данные частоты имеют величины порядка десятков килогерц. При этом квазистатический режим обеспечивается в диапазоне частот от долей герц до нескольких единиц килогерц.

Детальный анализ процессов формирования ФА отклика (в многослойных структурах с пьезоэлектрическими слоями в квазистатическом приближении) проведен в работах [20, 21].

В данной работе, в случае низкочастотного возбуждения, экспериментальные структуры имели вид многослойных пластин с размерами в основной плоскости 6×6 мм и с толщиной слоев: ПК – 50 мкм, кремний – 450 мкм, буфер (стеклокерамика «ситалл») – 1 мм, пьезокерамика – 200 мкм.

Возбуждение тепловых (а, следовательно, и термоупругих) колебаний осуществлялось с помощью светодиода ($\lambda = 450$ нм, электрическая мощность – 3 Вт) в режиме прямоугольной модуляции тока питания со скважностью 2.

2.2 Импульсное возбуждение

Для формирования ФА сигнала в случае импульсного возбуждения использовали стенд, схематическое изображение которого приведено на рис. 1.

Для возбуждения ФА отклика использовали Nd:Yag лазер (длина волны 532 нм, продолжительность импульса 20 нс, энергия в импульсе 40 мДж, частота повторения 1 Гц).

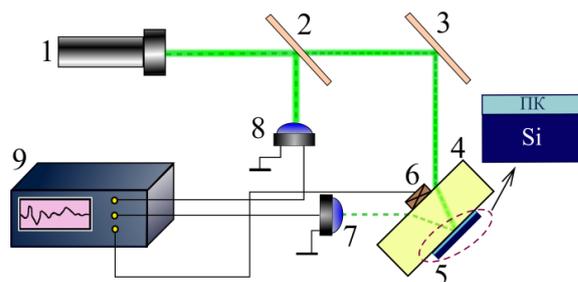


Рис. 1 – Схематическое изображение экспериментального стенда (импульсный источник возбуждения): 1) импульсный лазер; 2) делительная пластина; 3) зеркало; 4) буфер (прозрачный акрил); 5) образец; 6) пьезопреобразователь; 7,8) фотодиод; 9) осциллограф

Образец ПК, со стороны композитного слоя, при помощи прозрачного связующего на каучуковой основе, акустически жестко соединен с буферным слоем толщиной 30 мм. Буферный слой изготовлен из оптически прозрачного акрила (оргстекло). Его назначение – обеспечить доступ лазерного излучения к внешней поверхности пористого слоя образца (граница раздела с буфером), а также создать задержку ФА отклика по времени для развязки информационного отклика от электромагнитной помехи, вызванной импульсом накачки лазера. Для регистрации акустического отклика использовали пленочный поливинилиденфторидный пьезопреобразователь толщиной 52 мкм и размером 5×5 мм. Для контроля интенсивности света и обеспечения запуска осциллографа, часть светового потока перенаправлялась делительной пластиной (2) на фотодиод (8). Форму и амплитуду ФА отклика фиксировали цифровым осциллографом Tektronix MSO2024B (9). Импульсные сигналы, сформированные фотодиодами (7, 8) при вспышке лазера, после усиления использовали также для синхронизации запуска осциллографа и контроля энергии импульса возбуждения.

2.3 Образцы пористого кремния и композитных систем на его основе

Слой мезопористого кремния готовили стандартным методом электрохимического травления [22, 23] в растворе концентрированной плавиковой кислоты (49 %) в этаноле (объемное соотношение 1:1). Исходный материал – высоколегированный кремний р-типа с удельным сопротивлением 0,01-0,02 Ом·см. Анодирование проводили в режиме старт-стоп (2 с травление – 2 с пауза). Плотность тока анодирования составляла 50 мА/см², 100 мА/см² и 200 мА/см² для получения значений пористости 45 %, 55 % и 65 % соответственно. Заданная толщина пористого слоя обеспечивалась выбором времени травления.

Приготовление образцов ПКЖ проводили путем заполнением пор ПК маслом МБП-12. Процесс осуществляли погружением образцов в жидкость после откачки воздуха из колбы, где предварительно размещались исходные компоненты композита.

3. РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

На рисунках 2 и 3 показаны формы зависимо-

стей от времени ФА отклика соответственно для случаев периодического квазистатического и импульсного возбуждения. На рис. 2а и 3а представлены формы сигнала от образцов ПК, на рис. 2б и 3б – формы откликов для композитных систем ПКЖ.

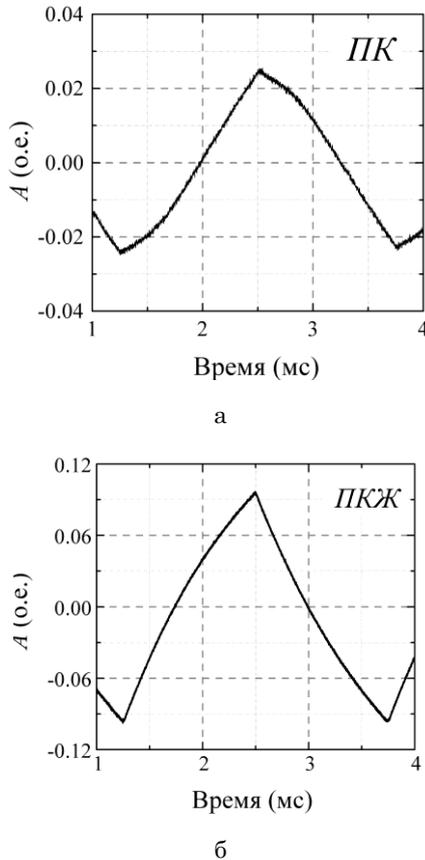


Рис. 2 – Осциллограммы акустических откликов при квазистатическом возбуждении (частота модуляции 400 Гц для образцов ПК (а) и композита ПКЖ (б))

В обоих случаях, как квазистатического, так и импульсного возбуждения, в результате заполнения пор жидкостью наблюдается значительный прирост амплитуды ФА отклика. Более того, в случае возбуждения квазистатических колебаний указанное увеличение сопровождается также и изменениями формы сигнала. Причины данных изменений детально разобраны в работе [18].

В случае импульсного возбуждения, форма отклика остается практически неизменной как с пустыми (заполнены воздухом) порами, так и с порами, заполненными жидкостями. Указанный факт можно трактовать как свидетельство неизменности физических механизмов, которые определяют формирование ФА отклика.

На гистограммах, приведенных на рис. 4, показаны соотношения амплитуд ФА отклика, полученных от образцов ПК и композитных систем ПКЖ разной пористости.

Сравнивая данные, приведенные на гистограммах (рис. 4) можно отметить следующее:

Во-первых, рост амплитуды ФА отклика с ростом пористости для композитных систем ПКЖ происходит значительно быстрее в случае импульсного воз-

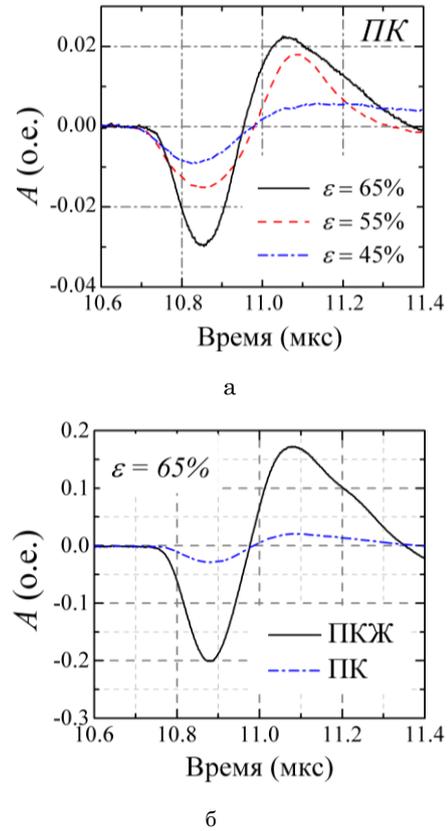


Рис. 3 – Осциллограммы акустических откликов при импульсном возбуждении для образцов ПК разной пористости (а) и композитов ПКЖ (б)

буждения, чем в случае периодического низкочастотного возбуждения. Это противоречит данным работ, согласно которым [20, 24, 25] амплитуда ФА отклика A в обоих случаях (квазистатическое и импульсное возбуждение) пропорциональна величине

$$A \sim \alpha_T^k E_k \Delta T, \tag{1}$$

где α_T^k – эффективный коэффициент теплового расширения композита, E_k – эффективный модуль Юнга композита. С учетом того, что $\Delta T \sim 1/(c\rho)$, где c – теплоемкость композита, ρ – плотность материала, имеем в обоих случаях для амплитуд отклика $A_{нч}$, $A_{имп}$, (низкочастотное и импульсное возбуждение): $\alpha_T^k E_k / (c\rho)$.

Во-вторых, для образцов ПК без наполнителя имеет место разный знак изменения амплитуды отклика с увеличением пористости в зависимости от способа его получения. Так, при квазистатическом возбуждении, образцы с большей пористостью дают меньший отклик, чем образцы с меньшими ее значениями. Напротив, при импульсном возбуждении большая амплитуда отклика достигается при больших значениях пористости.

Более быстрый рост амплитуды $A(\varepsilon)$, чем тот, что описывается зависимостью (1), не является проявлением нелинейных (по отношению к приросту температуры) эффектов, поскольку, это обстоятельство было нами исключено путем сравнения отклика при фокусировании одного и того же потока оптического излучения на различных по площади (от 1 мм² до

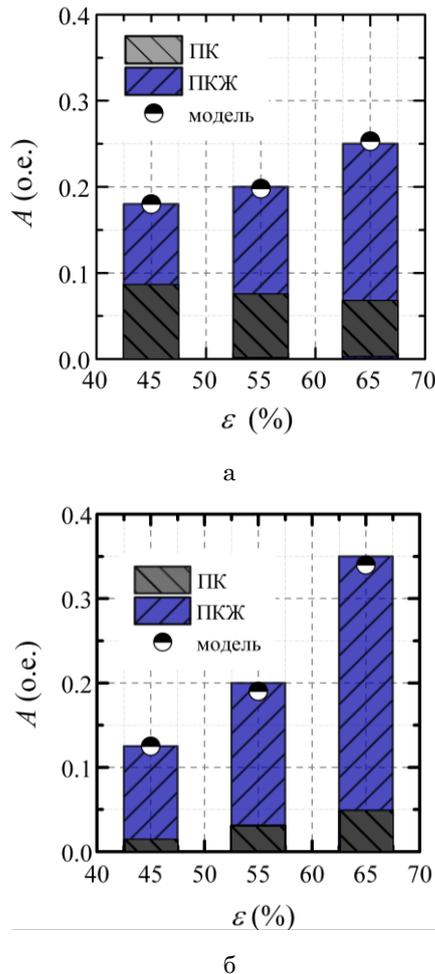


Рис. 4 – Гистограммы амплитуд акустического отклика для образцов ПК разной пористости и композитов ПКЖ на их основе в случаях квазистатического (а) и импульсного (б) возбуждения

50 мм²) участках образца с пористостью 65 %. Изменения амплитуды отклика при этом находилось в пределах 15 % от ее величины и имели случайный характер. Наиболее вероятной причиной экспериментально наблюдаемой более крутой зависимости амплитуды отклика от пористости образцов, в случае импульсного возбуждения является изменение акустического сопротивления (импеданса) при переходе через интерфейс «композит/буферный акриловый слой». Акрил имеет существенно более низкое значение волнового акустического сопротивления, чем кремний. С ростом пористости композита происходит приближение значения его импеданса к импедансу акрила. Вследствие чего возрастает амплитуда давления звуковой волны, прошедшей в буферный слой через границу раздела сред.

Различие знаков прироста амплитуды для ПК без наполнителя в случаях периодического и импульсного возбуждения можно объяснить различием условий возбуждения. Так, при квазистатическом возбуждении уменьшение отклика с ростом пористости обусловлено уменьшением упругих модулей материала образца. Рост же отклика при импульсном возбуждении связан с тем, что основная его часть формируется в акустической связке (каучук) на фрон-

тальной поверхности образца. Увеличение пористости приводит к росту температуры поверхности, а, следовательно, и к большему нагреву каучука.

Для подтверждения представлений о том, что на характер зависимости амплитуды ФА отклика от пористости образца в случае импульсного возбуждения существенно влияет согласованность акустических импедансов на границе раздела ПК/буфер (в области поглощения оптического возбуждения) проведем количественный анализ.

Амплитуда регистрируемого отклика (импульсное возбуждение), согласно [26], пропорциональна

$$A \sim D \alpha_T^k E_k / c \rho, \quad (2)$$

$$D = 2Z_2 / (Z_1 + Z_2), \quad (3)$$

$$Z_1 = \rho_1 v_1, \quad (4)$$

$$v_1 = \sqrt{\frac{E_M}{\rho_1} \frac{1 - \eta}{(1 + \eta)(1 - 2\eta)}}, \quad (5)$$

где D – коэффициент прохождения звукового давления сквозь границу раздела, Z_1 – волновое сопротивление ПК, Z_2 – волновое сопротивление буфера, ρ_1 – плотность композита, v_1 – скорость звука в продольной волне, η – коэффициент Пуассона.

В случае квазистатического возбуждения, с изменением пористости образца, амплитуда отклика меняется согласно выражению (1).

Исходя из выражений (1-5) оценка амплитуды ФА отклика требует знания эффективного коэффициента теплового расширения композита α_T^k и его модуля Юнга E_k . Получение точных математических выражений для этих величин является сложной задачей механики. Эта задача аналитически решена лишь для немногих типов морфологии композита: матрицы армированной волокнами с различным типом упорядочения, пластинами, частицами разной формы и ряда других [27]. Даже в этих сравнительно простых случаях, при аналитическом описании упругих и термоупругих свойств композита, возникают значительные трудности, если различия в численных значениях соответствующих параметров компонентов велики. Для пористого кремния с жидкостями в порах, из-за сложности морфологии реальной матрицы ПК, проблема может быть решена лишь численными методами и для существенно упрощенных моделей. Ниже, значения для эффективного коэффициента теплового расширения композита α_T^k и его модуля Юнга E_k получены в рамках упрощенной модели композитной системы на основе пористой матрицы.

4. МОДЕЛЬ КОМПОЗИТА «ПОРИСТАЯ СРЕДА – ЖИДКОСТЬ»

Пористый кремний является анизотропным материалом, однако, в случае мезопористых слоев, полученных анодным травлением p^{++} -кремния, анизотропия не слишком выражена ввиду наличия пор высших порядков и для описания упругих свойств часто используют скалярные коэффициент теплового расширения и модуль Юнга [1]. Для простоты рас-

смотрим модель матрицы ПК в виде трехмерной решетки взаимно пересекающихся бесконечных стержней квадратного сечения (рис. 5). На рис. 5б показана элементарная ячейка такой решетки. Параметр решетки a . Введем обозначение: $\gamma = B/a$, где $B = a - A$; A – линейный размер кубической области пересечения стержней в узле решетки, равный длине стороны сечения стержней. Несложно показать, что пористость матрицы ε связана с параметром γ выражением:

$$\varepsilon = \gamma^2(3 - 2\gamma)$$

Будем считать, что поры матрицы полностью заполнены жидкостью с вязкостью, достаточной для того, чтобы при быстром нагреве (в ходе ФА преобразования) можно было бы полностью пренебречь релаксационными процессами, связанными с перетеканием жидкости.

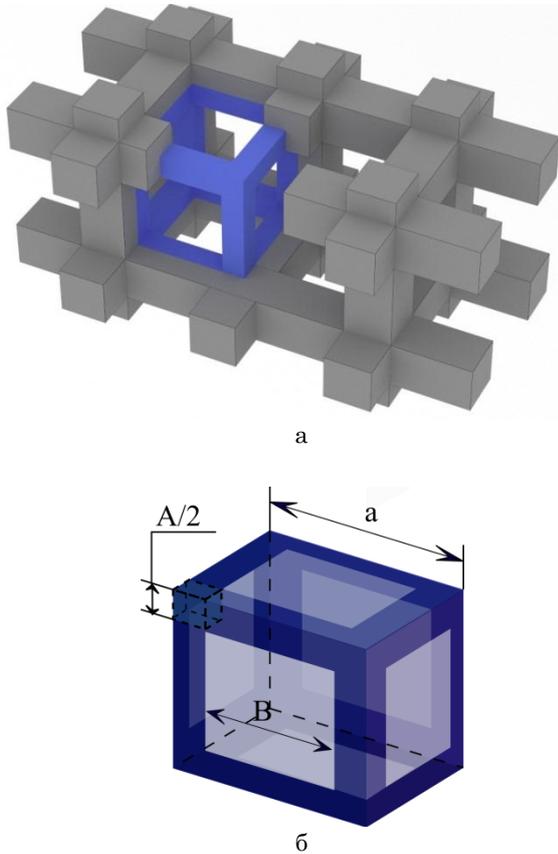


Рис. 5 – Фрагмент модельной структуры пористой матрицы в виде трехмерной решетки квадратных в сечении стержней (а) и ее элементарная ячейка (б)

Будем считать, что упругие модули материала матрицы для участков, соединяющих узлы, понижены и равны: E_M/m , где m – отношения модулей Юнга исходного материала (в рассматриваемом случае кремния) к модулю Юнга участков матрицы между узлами. Такое уменьшение можно обосновать наличием пор высшего порядка в материале стенок более крупных пор и переменным сечением реальных участков матрицы вокруг пор. Можно предположить, что с ростом пористости ПК значение m возрастает.

Данная модель позволяет оценить эффективные модули Юнга и коэффициенты теплового расширения, как матрицы ПК, так и композитных системы типа ПКЖ.

С этой целью рассмотрим одноосную деформацию модельной структуры вдоль ребра элементарной ячейки. Несложно показать, что модуль Юнга для композитных систем типа ПКЖ определится тогда следующим выражением:

$$E_k = \frac{\sigma}{\Delta l/a} + \frac{3\varepsilon}{\chi}$$

где σ – упругие напряжения в поперечном сечении соединительных стержней (ребер), Δl – абсолютное удлинение (сжатие) узлов и ребер элементарной ячейки, χ – сжимаемость жидкости.

Учитывая, что удлинение ребра элементарной ячейки является суммой деформаций ΔA – ее узлов и ΔB – ребер: $\Delta l = \Delta A + \Delta B$, получим выражение для модуля Юнга композитных систем типа ПКЖ:

$$E_k = \frac{E(1 - \gamma)^2}{\gamma m + (1 - \gamma)} + \frac{3\varepsilon}{\chi}$$

где E – модуль Юнга кристаллического кремния.

Для оценки величины коэффициента теплового расширения композитной системы ПКР, рассмотрим растяжение матрицы вследствие однородного быстрого прироста температуры на величину ΔT . Учитывая, что коэффициент теплового расширения матрицы намного меньше коэффициента теплового расширения жидкостей ($\alpha_T^M \ll \alpha_T^J$), будем считать, что увеличение линейных размеров матрицы ПК не приводит к заметным изменениям давления жидкости. Таким образом, в отсутствии перетекания жидкости прирост ее давления ΔP в порах определяется увеличением температуры и зависит только от коэффициента теплового расширения и сжимаемости χ жидкости:

$$\Delta P = \frac{3\alpha_T^J \Delta T}{\chi}$$

Полная деформация матрицы, по способу формирования, может быть разделена на четыре формально независимых составляющих:

1. Собственное тепловое расширение матрицы, в расчете на одну ячейку – $\Delta a_T = a\alpha_T^M \Delta T$
2. Растяжение ребер решетки давлением жидкости на ребра элементарной ячейки – прирост параметра решетки на величину ΔB_T

$$\Delta B_T = \frac{mB\sigma}{E} = \frac{mB\Delta P(a^2 - A^2)}{EA^2}$$

3. Растяжение ребер при их поперечном сжатии давлением жидкости – прирост линейных размеров в расчете на элементарную ячейку ΔB_η

$$\Delta B_\eta = \frac{2mB\Delta P\eta}{E}$$

4. Растяжение кубических областей вблизи узлов

решетки напряженными ребрами – прирост параметра решетки на ΔA

$$\Delta A = \frac{\sigma A}{3K} = \frac{A\Delta P(1-2\eta)(a^2 - A^2)}{EA^2}$$

где K – объемный модуль упругости кремния.

Несложно показать, что результирующее выражение для коэффициента теплового расширения композита

$$\alpha_T = \frac{\Delta a_T + \Delta B_T + \Delta B_\eta + \Delta A}{a\Delta T}$$

может быть представлено в виде:

$$\alpha_T^k = \alpha_T^M + 3\alpha_T^{\text{Ж}} \frac{\gamma}{E_X} \delta$$

$$\delta = 2\eta m + \frac{2-\gamma}{1-\gamma} \left(\frac{m}{1-\gamma} + (1-2\eta) \right)$$

Данные, полученные для амплитуды отклика согласно выражениям (1) и (2), нормированные по образцам с пористостью 45%, показаны на гистограммах значками (рис. 5). При расчетах были получены и использовались параметры композитных материалов, приведенные в табл.1. Видно, что более быстрый рост амплитуды ФА отклика с ростом пористости (согласно выражению 2) в случае импульсного возбуждения, качественно соответствует эксперименту. Расхождения в пределах 5% вероятно связаны с дополнительным вкладом в сигнал отклика, сформированного в клеевом слое.

Таблица 1 – Расчетные значения параметров композитного материала ПКЖ в зависимости от пористости матрицы

ε	45%	55%	65%
E_M , ГПа	32	20	10
E_K , ГПа	34	22,5	12,8
$\alpha_T^k \cdot 10^{-4}$, K^{-1}	0,27	0,46	1
m	1,5	2	3
v_1 , м/с	5100	4300	2900
$Z_1 \cdot 10^3$, кг/м ² с	8700	6700	4000

Формування фотоакустичного відгуку в наноструктурованих композитних системах «поровата матриця – рідина»

К.В. Войтенко¹, Д.А. Андрусенко¹, А.Ю. Пастушенко², М.В. Ісаєв¹, А.Г. Кузьмич¹, Р.М. Бурбело¹

¹ Київський національний університет імені Тараса Шевченка, вул. Володимирська, 64/13, 01601 Київ, Україна

² University of Lyon, Nanotechnology Institute of Lyon, UMR CNRS 5270, INSA de Lyon, F69621, France

В роботі представлено результати експериментальних досліджень процесів формування фотоакустичного відгуку в наноструктурованих композитних системах «поровата матриця - рідина». Розглянуто випадки низькочастотної періодичної модуляції та імпульсного лазерного збудження. Встановлено, що в обох випадках амплітуда фотоакустичного відгуку істотно зростає з ростом поруватості матриці. Запропоновано спрощену модель композитної системи на основі поруватої матриці, що дозволило виконати коректні (узгоджуються з експериментом) оцінки величин модулів Юнга і коефіцієнтів теплового розширення композитних систем різної поруватості, а також величин амплітуди акустичних відгуків.

Ключові слова: Фотоакустичний відгук, Мезопоруватий кремній, Композитна система «поровата матриця – рідина».

D	0,92	0,63	0,5
$A_{\text{нл}}$, о.е.	0,18	0,2	0,25
$A_{\text{лм}}$, о.е.	0,13	0,19	0,34

5. ВЫВОДЫ

В работе представлены результаты экспериментальных исследований наноструктурированных композитных систем «пористая матрица - жидкость» с разными значениями пористости матрицы. Проанализированы процессы формирования фотоакустического отклика в таких системах. Предложена упрощенная модель композитной системы на основе пористой матрицы, расчеты согласно которой качественно согласовываются с экспериментом.

Установлено, что как при низкочастотном периодическом, так и при импульсном возбуждении, ФА отклик возрастает по амплитуде с ростом пористости образца. Более быстрый рост отклика в случае импульсного возбуждения обусловлен изменением условий согласования акустических волновых сопротивлений образца с большим значением пористости и буфера.

Использование композитной системы «пористый кремний – жидкость» для формирования акустического импульса позволяет существенно (как минимум на порядок) увеличить его амплитуду.

Полученные данные важны для оптимизации условий возбуждения ФА отклика, в частности, в приложениях, связанных с возбуждением коротких звуковых импульсов в средах с низким волновым акустическим сопротивлением. Практически важным случаем тут являются биологические ткани, что важно при использовании в целях терастики.

БЛАГОДАРНОСТЬ

Работа частично выполнена в рамках проекта Марии Склодовской-Кюри «Обмен научным и инновационным персоналом» CARTHER № 690945 (2016-2020).

Photoacoustic Response Formation in Nanostructured Composite Systems «Porous Matrix – Liquid»

K. Voitenko¹, D. Andrusenko¹, A. Pastushenko², M. Isaiev¹, A.G. Kuzmich¹, R.M. Burbelo¹

¹ Taras Shevchenko National University of Kyiv, 64/13, Volodymyrska Str., 01601 Kyiv, Ukraine

² University of Lyon, Nanotechnology Institute of Lyon, UMR CNRS 5270, INSA de Lyon, F69621, France

The results of experimental studies of the processes of photoacoustic response formation in nanostructured composite systems «porous matrix-liquid» are presented. The cases of low-frequency periodic modulation and pulsed laser excitation are considered. It is established that in both cases the amplitude of the photoacoustic response increases substantially with the matrix porosity increase. A simplified model of a composite system based on a porous matrix was proposed, which allowed to carry out correct estimates of the Young's modulus and the thermal expansion coefficients of composite systems with different porosity, as well as the amplitude of the acoustic response (in agreement with experiment).

Keywords: Photoacoustic response, Mesoporous silicon, Composite system «porous matrix -liquid»

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. L.T. Canham, *Properties of Porous Silicon* (UK, London: IEE INSPEC, The Institution of Electrical Engineers: 1997).
2. G. Korotcenkov, *Porous Silicon: From Formation to Application: Formation and Properties, Volume One* (CRC Press: Boca Raton: 2015).
3. O. Bisi, S. Ossicini, L. Pavesi, *Surf. Sci. Rep.* **38**, 1 (2000).
4. E. Tasciotti, X.W. Liu, R. Bhavane, K. Plant, A.D. Leonard, B.K. Price, M.M.C. Cheng, P. Decuzzi, J.M. Tour, F. Robertson, M. Ferrari, *Nat. Nanotechnol.* **3**, 151 (2008).
5. T. Tanaka, L.S. Mangala, P.E. Vivas-Mejia, R. Nieves-Alicea, A.P. Mann, E. Mora, H.-D. Han, M.M.K. Shahzad, X. Liu, R. Bhavane, J. Gu, J.R. Fakhoury, C. Chiappini, C. Lu, K. Matsuo, B. Godin, R.L. Stone, A.M. Nick, G. Lopez-Berestein, A.K. Sood, M. Ferrari, *Cancer. Res.* **70**, 3687 (2010).
6. F. Wang, T.J. Barnes, C.A. Prestidge, *Mesoporous Biomater.* **1**, 1 (2014).
7. S. Näkki, J. Rytönen, T. Nissinen, C. Florea, J. Riikonen, P. Ek, H. Zhang, H.A. Santos, A. Näränen, W. Xu, V.-P. Lehto, *Acta Biomater.* **13**, 207 (2015).
8. C.-C. Wu, M.J. Sailor, *ACS Nano* **7**, 3158 (2013).
9. J. Riikonen, W. Xu, V.-P. Lehto, *Electrochem Eng Nanoporous Mater Methods, Prop. Appl.* (Eds. by D. Losic, A. Santos) (Springer International Publishing: Cham: 2015).
10. J. Funkhouser, *Curr. Drug Discovery* **2**, 17 (2002).
11. T. Kim, G.B. Braun, Z. She, S. Hussain, E. Ruoslahti, M.J. Sailor, *ACS Appl. Mater. Interfaces* **8**, 30449 (2016).
12. C.F. Wang, M.P. Sarparanta, E.M. Makila, M.L.K. Hyvonen, P.M. Laakkonen, J.J. Salonen, J.T. Hirvonen, A.J. Airaksinen, H.A. Santos, *Biomaterials* **48**, 108 (2015).
13. A. Chaix, K. El Cheikh, E. Bouffard, M. Maynadier, D. Aggad, V. Stojanovic, N. Knezevic, M. Garcia, P. Maillard, A. Morere, M. Gary-Bobo, L. Raehm, S. Richeter, J.-O. Durand, F. Cunin, *J. Mater. Chem. B* **4**, 3639 (2016).
14. H.A. Santos, L.M. Bimbo, B. Herranz, M.-A. Shahbazi, J. Hirvonen, J. Salonen, *J. Mater. Res.* **28**, 152 (2013).
15. C.A. Prestidge, T.J. Barnes, C. Lau, C. Barnett, A. Loni, L. Canham, *DrugDeliv.* **4**, 101 (2007).
16. M.B. Gongalsky, A.Y. Kharin, L.A. Osminkina, V.Y. Timoshenko, J. Jeong, H. Lee, B.H. Chung, *Nanoscale Res. Lett.* **7**, 446 (2012).
17. R. Burbelo, D. Andrusenko, M. Isaiev, A. Kuzmich, *Arch. Metall. Mater.* **56**, 1157 (2011).
18. D. Andrusenko, M. Isaiev, A. Kuzmich, V. Lysenko, R. Burbelo, *Nanoscale Res. Lett.* **7**, 411 (2012).
19. С.М. Жаркий, А.А. Карабутов, И.М. Пеливанов, Н.Б. Подымова, В.Ю. Тимошенко, *Физика и техника полупроводников* **37**, 468 (2003) (S.M. Zharkii, A.A. Karabutov, I.M. Pelivanov, N.B. Podymova, V.Yu. Timoshenko, *Semiconductors* **37**, 468 (2003)).
20. M. Isaiev, D. Andrusenko, A. Tytarenko, A. Kuzmich, V. Lysenko, R. Burbelo, *Int. J. Thermophys.* **35**, 2341 (2014).
21. A.I. Tytarenko, D.A. Andrusenko, A.G. Kuzmich, I.V. Gavril'chenko, V.A. Skryshevskii, M.V. Isaiev, R.M. Burbelo, *Tech. Phys. Lett.* **40**, 188 (2014).
22. M.M. Orosco, C. Pacholski, M.J. Sailor, *Nat. Nanotechnol.* **4**, 255 (2009).
23. V. Lehmann, R. Stengl, A. Luigart, *Mater. Sci. Eng. B* **69**, 11 (2000).
24. Z. Zhao, R. Myllyla, *Mol. Quantum Acoust.* **23**, 451 (2002).
25. S.R. Ravishankar and B.E. Jones, *NDT & E Int.* **40**, 602 (2007).
26. Д.А. Костюк, Ю.А. Кузавко, *Письма в ЖТФ* **27**, 31 (2001) (D.A. Kostyuk, Yu.A. Kuzavko, *JETF Lett.* **27**, 31 (2001)).
27. R.M. Christensen, *Mechanics of Composite Materials* (Mineola, NY: Dover Publ.: 2005).