

Долгоживущие гиперзвуковые моды в трехмерных гиперзвуковых фотонно-фононных кристаллах на основе синтетических опалов

А. С. Саласюк¹, А. В. Щербаков¹, А. В. Акимов¹, С. Ф. Каплан¹, С. А. Грудинкин¹, А. Б. Певцов¹, В. Г. Голубев¹, Д. Р. Яковлев^{1,2}, T. Berstermann² и M. Bayer²

¹ ФТИ им. А. Ф. Иоффе, Санкт-Петербург, Россия

тел: (812) 292-7174, факс: (812) 297-1017, эл. почта: salasyuk@mail.ioffe.ru

² Technische Universität Dortmund, Dortmund, Germany

тел: 0231 755-35-32, факс: 0231 755-36-74, эл. почта: manfred.bayer@tu-dortmund.de

В работе представлены результаты исследований гиперзвуковых колебаний в трехмерных фотонно-фононных кристаллах на основе пленок синтетических опалов. В таких системах существует одновременно периодическая модуляция диэлектрической проницаемости и периодическая модуляция акустического импеданса на масштабе порядка длины волны света. В результате модуляции акустического импеданса в колебательном спектре фононных кристаллов появляются запрещенные зоны. Это значит, что в идеальном кристалле распространение упругих колебаний с частотой, лежащей внутри запрещенной зоны, будет полностью подавлено. В реальной структуре должно наблюдаться увеличение времени жизни локализованных упругих колебаний, частоты которых попадают внутрь фононной запрещенной зоны. Наименее изученными в настоящее время являются трехмерные фононные кристаллы, в которых запрещенная фононная зона лежит в гига-, терагерцовой (10^9 - 10^{12} Гц) областях частот. Поиску долгоживущих упругих мод в таких кристаллах посвящена данная работа.

В качестве исследуемых структур были выбраны плёночные синтетические опалы — плотноупакованные в гранецентрированную кубическую решетку сферы аморфного оксида кремния (α -SiO₂) диаметром 350 нм, осаждённые на кварцевую подложку. Исследовались опалы с различным количеством монослоёв (3-10) и различной степенью спекания (взаимного проникновения сфер α -SiO₂ друг в друга). Колебания составляющих опал сфер возбуждались с помощью гиперзвукового оптоакустического преобразователя — алюминиевой плёнки толщиной 100 нм, нанесённой на поверхность образца. Пленка освещалась мощными лазерными импульсами длительностью ~ 100 фс и плотностью энергии до 2 мДж/см². В результате быстрого термического расширения алюминиевой пленки в образец впрыскивался импульс деформации — когерентный волновой пакет акустических колебаний с частотой до 10^{11} Гц. Возбужденные таким образом колебания кристалла детектировались с высоким временным разрешением по модуляции интенсивности отраженного от образца пробирующего лазерного импульса, синхронизированного с импульсом возбуждения («pump-probe» метод). Принцип детектирования колебаний основан на модуляции фотонно-кристаллических свойств опала и соответствующей модуляции коэффициента отражения для света с длиной волны, лежащей в пределах фотонной стоп-зоны [1].

Фурье-анализ полученных сигналов показал, что спектр акустических колебаний, в котором присутствуют как долгоживущие, так и быстро затухающие колебательные моды, зависит от структурных параметров исследуемых образцов. Быстро затухающая мода с частотой 11 ГГц проявляется во всех измеренных сигналах и может быть связана с лэмбовскими колебаниями одиночных сфер [1, 2]. Долгоживущая (~1 нс) мода с частотой 7.5 ГГц обнаружена лишь в колебательных спектрах образцов с высоким структурным совершенством и низкой степенью спекания. Колебания с частотой 7.5 ГГц могут быть связаны с поверхностной или иной локализованной модой, частота которой лежит в пределах фононной запрещенной зоны. Такая интерпретация полученных результатов основана на сопоставлении экспериментальных данных с расчетами фононной зонной структуры реальных опалов (с учетом границ и конечного количества монослоев) [2].

Работа выполнена при поддержке РФФИ, ФАНИ, РАН и DFG.

Литература

1. A. V. Akimov et al. , Phys. Rev. Lett. 101, 033902 (2008).
2. Y. Tanaka et al. , J. Phys. : Conf. Series 92, 012107 (2007).