

УДК 534.211

ЗАКОН ДИСПЕРСИИ АКУСТИЧЕСКИХ ВОЛН В ФОНОННЫХ КРИСТАЛЛАХ, ЗАПОЛНЕННЫХ ДИЭЛЕКТРИКОМ ИЛИ МЕТАЛЛОМ

В. В. Филатов, В. С. Горелик

Приводятся результаты теоретических исследований акустических свойств глобулярных фоновых кристаллов на основе искусственных опалов, состоящих из плотно упакованных глобул SiO_2 диаметром около 200 нм. Проведены расчеты дисперсионных характеристик изучаемых образцов, определена групповая скорость фононов, а также их эффективная масса.

Ключевые слова: фоновый кристалл, закон дисперсии, глобулы, опал.

В настоящее время технология позволяет создавать материалы, обладающие периодической сверхструктурой – так называемые фотонные кристаллы (ФК). Как оказалось, в акустическом диапазоне в ФК присутствуют запрещенные зоны, т.е. ФК является также фоновым кристаллом (ФНК). Изучение дисперсионных свойств ФК в акустическом диапазоне частот проводится в данной работе. В качестве основы для расчета было взято уравнение распространения акустических волн в одномерных слоистых средах, аналогичное дисперсионному уравнению для электромагнитных волн

$$\cos k_1 a_1 \cdot \cos k_2 a_2 - \frac{1}{2} \frac{V_1^2 + V_2^2}{V_1 \cdot V_2} \sin k_1 a_1 \cdot \sin k_2 a_2 = \cos ka. \quad (1)$$

Величины, входящие в (1), имеют следующий физический смысл: $i = 1$ – индекс, относящийся к SiO_2 (опаловой матрице); $i = 2$ – индекс, соответствующий пустотам, заполненным металлом; $V_1 = 3344$ м/с – скорость распространения продольных акустических колебаний в опале; V_2 – скорость звука в среде, заполняющей опаловые поры (для воздуха – 342 м/с, в случае воды – 1485 м/с, в золоте – 3200 м/с); $\eta = 0.26$ – коэффициент эффективной пористости образцов; $D = 220$ нм – диаметр глобул кварца; $a = D\sqrt{2/3}$ – период структуры изучаемых образцов опалов; $a_1 = (1 - \eta)a$, $a_2 = \eta a$;

Физический институт им. П. Н. Лебедева Российской академии наук.
Московский государственный университет имени Н. Э. Баумана.

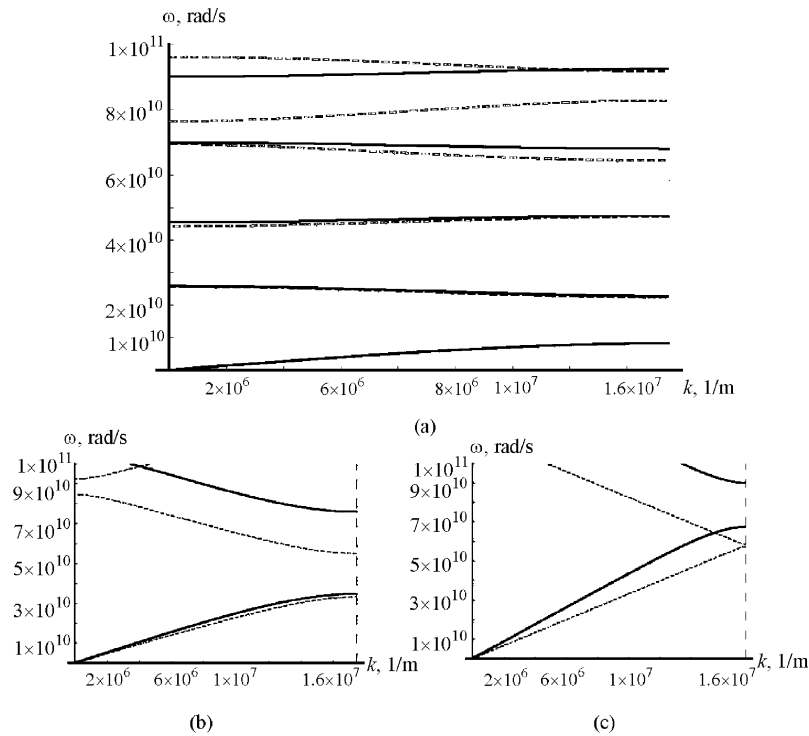


Рис. 1: Закон дисперсии акустических волн в исходном опале (а), в фоновом кристалле, заполненном водой (b) или золотом (с).

ω_i – циклическая частота акустической волны; $k_i(\omega) = \omega/V_i$ – волновой вектор в i -ой среде. Результаты численного решения трансцендентного уравнения (1) представлены на рис. 1. По оси абсцисс отложены значения волнового вектора (м^{-1}), по оси ординат – циклическая частота (рад/с). При этом рис. 1(а) соответствует образцу, поры которого пусты, рис. 1(б) – опалу, заполненному водой, рис. 1(с) – кристаллу, в поры которого введено золото. Сплошной линией обозначены продольные акустические волны, пунктиром – поперечные.

На основании результатов дисперсионного анализа были найдены дисперсионные зависимости групповых скоростей фононов в исследуемых образцах:

$$V(\omega) = \frac{dE}{dp} = \frac{d\omega}{dk} = 1/\frac{dk(\omega)}{d\omega}. \quad (2)$$

При этом было установлено, что вблизи краев запрещенной зоны групповая скорость звуковых волн аномально уменьшается. Нами была проанализирована также дисперсионная зависимость эффективной массы фононов по формуле $m(\omega) = \hbar \cdot \left(\frac{d^2\omega}{dk^2} \right)^{-1}$.

Были получены следующие значения эффективной массы покоя фононов: в исходном опале $m_0 = 9 \cdot 10^{-30}$ кг, в опале с H_2O – $3 \cdot 10^{-30}$ кг, а в образце с Au – $5 \cdot 10^{-31}$ кг.

Работа выполнена при поддержке РФФИ; гранты: 07-02-00106, 07-02-12027, 08-02-00114, 08-02-90020, 08-02-90252, а также Программы N 27 Президиума РАН “Основы фундаментальных исследований нанотехнологий и наноматериалов”.

По материалам 3 Всероссийской молодежной школы-семинара “Инновационные аспекты фундаментальных исследований по актуальным проблемам физики”, Москва, ФИАН, октябрь 2009 г.

Поступила в редакцию 23 декабря 2009 г.