

УДК 533.361.2

НИЗКОЧАСТОТНОЕ ВКР НА АКУСТИЧЕСКИХ КОЛЕБАНИЯХ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИХ НАНОСФЕР В ВОДНОЙ СУСПЕНЗИИ

А. Ф. Бункин¹, М. А. Давыдов¹, В. Н. Леднев¹, С. М. Першин¹,
Е. А. Трифонова², А. Н. Федоров¹

При определенной концентрации в водной суспензии наночастиц диэлектрика (сферы из латекса) был зарегистрирован сигнал низкочастотного ВКР (НчВКР). Величина сдвига линии ВКР близка к её оценке по скорости “поперечного” гиперзвука в латексе.

Ключевые слова: вынужденное комбинационное рассеяние, скорость гиперзвука, суспензия наночастиц, нелинейное взаимодействие.

В последнее время появилось значительное число работ, посвященных исследованию суспензий наночастиц, что обусловлено высокими значениями оптических нелинейностей в этих средах [1–3]. Например, в [1] исследовали процессы вынужденного рассеяния в водных суспензиях сульфида лантана и хлорида цинка, в [2] – в водных эмульсиях металлических наночастиц, обусловленные взаимодействием лазерного излучения с акустическими модами наночастиц (НчВКР), а в [3] в водной суспензии золотых наностержней было зафиксировано НчВКР, обусловленное, как считают авторы, взаимодействием лазерного излучения с поверхностными поляритонами. Отмечена, в частности, высокая эффективность преобразования лазерного излучения в излучение НчВКР.

Целью настоящей работы являлось уточнение характера нелинейного взаимодействия в водной суспензии диэлектрических наносфер в зависимости от концентрации суспензии, при размерах наносфер, много меньших длины волны возбуждающего лазерного излучения.

Объект исследования и схема эксперимента. В качестве объекта исследования были использованы водные суспензии трех различных концентраций калиброванных сфер из латекса (полистирола) средним диаметром ~ 74 нм (рис. 1 (а)) [4]. Размеры частиц были

¹ НЦВИ ИОФ РАН, 119991 Россия, Москва, ул. Вавилова, 38.

² МГУ им. М. В. Ломоносова, 119991 Россия, Москва, Ленинские горы, д. 1.

проверены с помощью электронного микроскопа JEM-1400 (JEOL, Япония). Средний размер частиц составляет 70 ± 11 нм (среднее \pm стандартное отклонение; количество измерений $n = 100$). Минимальное значение 42 нм, максимальное 106 нм. Фотографии были проанализированы с помощью программы ImageJ (Национальный институт здоровья, США). Микрофотография – рис. 1(б).

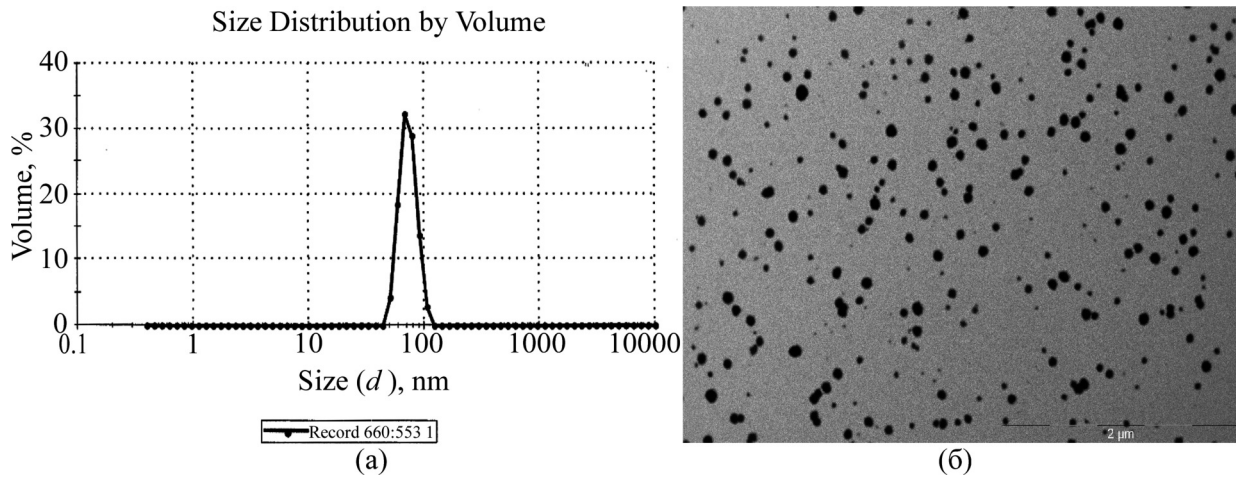


Рис. 1: (а) гистограмма применявшихся латексных сфер, (б) микрофотография латексных сфер.

Суспензии были приготовлены таким образом, что среднее расстояние между центрами двух соседних полистироловых сфер в трех различных образцах суспензии составляло: а) ~ 6900 нм, б) ~ 400 нм и с) ~ 100 нм. Суспензии были залиты в три идентичные кварцевые кюветы К, рабочей длиной ~ 20 мм. Кюветы поочередно размещали на установке (рис. 2).

Излучение второй гармоники ИАГ:Nd лазера, работающего в одномодовом одночастотном режиме (длина волны излучения $\lambda = 0.532$ мкм, ширина линии излучения $\Delta\nu \sim 0.005$ см $^{-1}$; длительность импульса излучения $t \sim 10$ нс, энергия в импульсе E_{pul} – до 40 мДж; нестабильность по энергии импульса $\sim 5\text{--}7\%$) фокусировали линзой L_1 с фокусным расстоянием ~ 30 мм в середину кюветы К. Возбуждаемое в кювете вынужденное рассеяние отводили для регистрации на интерферометры Фабри–Перо ИФП $_{1,2}$ с помощью клиновидной стеклянной пластинки Пл и зеркала Z_2 . После интерферометров оптический сигнал попадал на ПЗС-камеры, и затем обрабатывался на компьютере в программной среде LABVIEW. Пороговую энергию вынужденного рассеяния контролировали с помощью измерителя энергии ИМО-2Н (устанавливали временно перед линзой L_1). С помощью лавинного фотодиода ЛФД-2 и осциллогра-

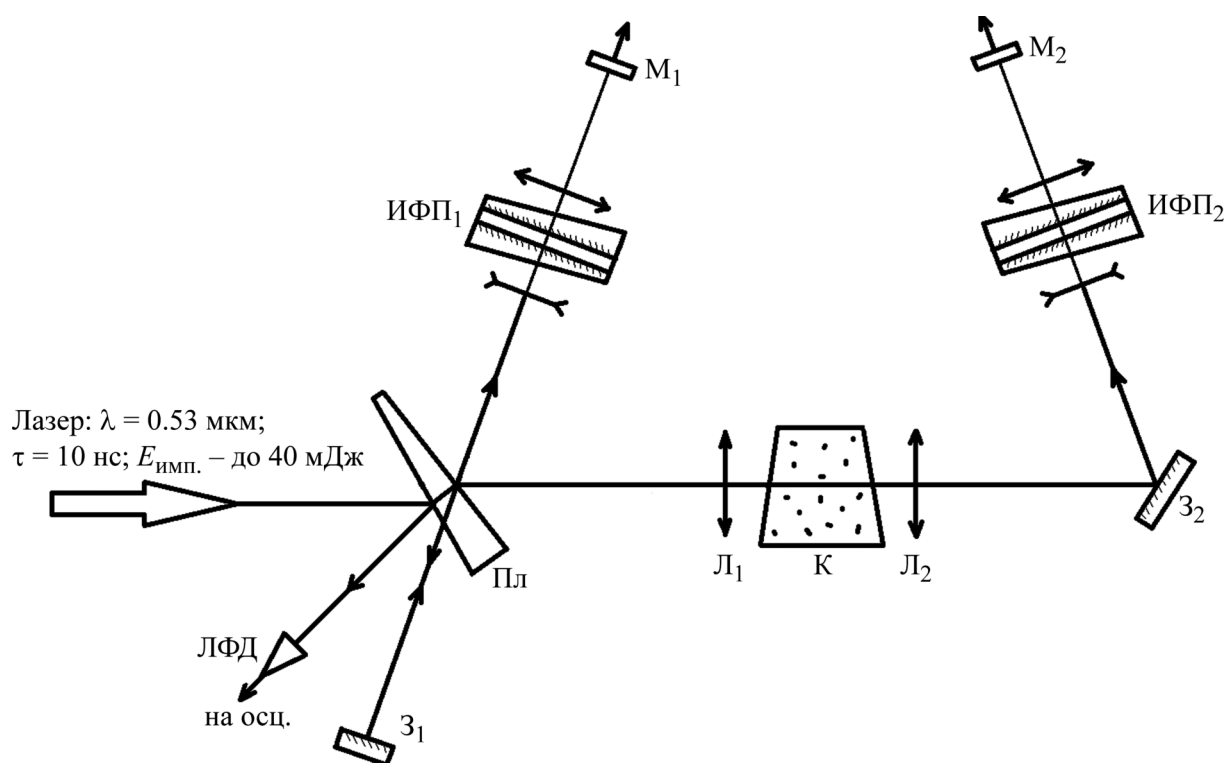


Рис. 2: Схема эксперимента. Пл – клиновидная делительная пластинка (стекло К-8); Z_1 , Z_2 – поворотные зеркала; L_1 , L_2 – софокусные линзы $f = 30$ мм; К – кварцевая ювета с исследуемой суспензией; ИФП₁, ИФП₂ – интерферометры Фабри–Перо с фокусирующей оптикой; M_1 , M_2 – ПЗС-камеры, ЛФД – лавинный фотодиод.

фа АКТАКОМ ADS-2332 (300 МГц) контролировали стабильность излучения лазера. Геометрия установки была одинакова для всего цикла измерений. В процессе измерений энергию лазерного импульса увеличивали от ~ 1 мДж до ~ 40 мДж.

Результаты измерений. Установлено, что для концентраций а) и б) при энергии лазера от ~ 1.0 мДж и 1.4 мДж соответственно и вплоть до ~ 40 мДж возбуждалась только стоксова компонента ВРМБ-назад. Сдвиг линии ВРМБ составлял ~ 0.245 см⁻¹, что соответствует сдвигу линии ВРМБ в чистой воде [5]. В случае в) порог ВРМБ-назад составлял ~ 3.6 мДж, а при увеличении энергии лазера до ~ 30 мДж на интерферометрах ИФП_{1,2} (т.е. одновременно в направлении “вперед” и “назад” относительно направления излучения лазера), была зафиксирована линия излучения, имевшая сдвиг ~ 0.63 см⁻¹ относительно линии лазера (рис. 3(а), (б)). С вынужденным рассеянием какого-либо типа в чистой воде такой сдвиг соотнести нельзя. По полистиролу: табличная величина продольной скорости звука в полистироле [6]: $V_{\text{зв}} = 2350$ м/с. Для этой скорости звука

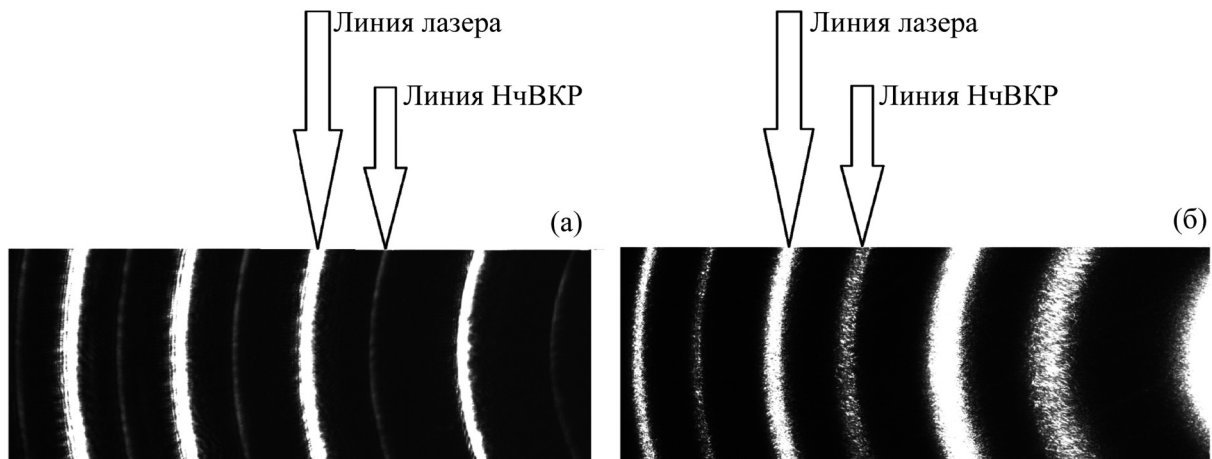


Рис. 3: (а) интерферограмма излучения лазера+НчВКР-“назад”. Область дисперсии интерферометра – 1.25 см^{-1} , (б) интерферограмма излучения лазера+НчВКР-“вперед”. Область дисперсии интерферометра – 1.25 см^{-1} .

сдвиг частоты рассеяния Мандельштама–Бриллюэна $\Delta\nu = 0.47 \text{ см}^{-1}$, а комбинационному сдвигу частоты $\Delta\nu = 0.63 \text{ см}^{-1}$, оцененному аналогично [1], соответствует размер частиц $\sim 124 \text{ нм}$.

Поперечная скорость звука в полистироле: $V_{\text{зв}} = 1120 \text{ м/с}$. Для этой скорости звука сдвиг частоты рассеяния Мандельштама–Бриллюэна должен быть $\Delta\nu = 0.22 \text{ см}^{-1}$, а комбинационному сдвигу частоты $\Delta\nu \sim 0.63 \text{ см}^{-1}$ соответствует размер частиц $\sim 59 \text{ нм}$. Таким образом, в данных условиях опыта имеет место излучение НчВКР, на частоте, соответствующей несколько меньшему размеру частиц ($\sim 59 \text{ нм}$), нежели их средний ($\sim 74 \text{ нм}$) размер.

Л И Т Е Р А Т У Р А

- [1] М. П. Жиленко, К. И. Земсков и др., *Новый вид вынужденного рассеяния света – вынужденное низкочастотное комбинационное рассеяние*, в сб. “Комбинационное рассеяние – 85 лет исследований” (ИФ СО РАН, Красноярск, 2013), с. 126-135.
- [2] N. V. Tcherniega, K. I. Zemskov, V. V. Savranskii, et al., *Optics Letters* **38**, 824 (2013).
- [3] Shi Jiulin, Wu Haopeng, et al, “Stimulated scattering effects in gold-nanorod-water samples pumped by 532 nm laser pulses”, www.nature.com/scientificreports; published: 15 July 2015.

- [4] Н. С. Лишанский, А. Ю. Меньшикова и др., *Высокомолекулярные соединения* **33**(6), 413 (1991).
- [5] В. С. Старунов, И. Л. Фабелинский, *УФН* **98**(3), 441 (1969).
- [6] В. А. Рабинович, Э. Я. Хавин, *Краткий химический справочник* (Л., Химия, 1978).

Поступила в редакцию 25 мая 2018 г.