

Низкочастотное вынужденное рассеяние света в суспензиях вирусов при пикосекундном возбуждении

© А.Ф. Бункин¹, М.А. Давыдов^{1*}, А.Н. Федоров¹, Е.В. Шашков¹, М.В. Архипенко², О.В. Карпова²

¹ Институт общей физики им. А.М. Прохорова РАН, 119991 Москва, Россия

² МГУ им. М.В. Ломоносова, Биологический факультет, 119234 Москва, Россия

e-mail: sbs_michail@mail.ru

Поступила в редакцию 18.05.2023 г.

В окончательной редакции 12.07.2023 г.

Принята к публикации 12.07.2023 г.

При возбуждении мощным пикосекундным импульсом второй гармоники YAP:Nd лазера в суспензиях морфологически подобных вирусов ВМАльт и ХВК обнаружены линии неупругого рассеяния с частотными отстройками в диапазоне $\sim 10\text{--}130$ GHz относительно лазерной линии. Данное рассеяние имеет пороговый характер, а совокупности его спектральных линий для разных образцов вирусов различны.

Ключевые слова: пикосекундный импульс, рассеяние света, порог возбуждения, суспензия вирусов.

DOI: 10.61011/OS.2023.08.56309.5186-23

Введение

В недавних работах, посвященных исследованию нелинейно-оптических свойств наночастиц, в качестве источника возбуждения среды использовали мощный наносекундный лазерный импульс с достаточно узкой спектральной линией излучения [1–3]. В результате удалось зарегистрировать ряд особенностей рассеяния света в гетерогенных средах: как собственно в суспензиях наночастиц, так и в суспензиях вирусов, что может представлять интерес для вирусологии [4,5]. В частности, было обнаружено, что в суспензиях морфологически сходных вирусов спектры вынужденного низкочастотного рассеяния лазерного излучения, лежащие в диапазоне частотных отстроек $\sim 3\text{--}60$ GHz, существенно различаются, что позволяет использовать этот факт для идентификации вирусных наночастиц в жидких суспензиях, т.е. в среде, близкой к нативной. Одной из причин различий спектров в этом случае может являться наличие регуляторных, а также структурных функциональных групп вириона (например капсомеров [6]), различающихся по своим механическим свойствам в предложенной модели неоднородного упругого стержня [4,5].

Эксперимент

В качестве опытных образцов были использованы исследованные ранее суспензии вирусов: вируса мозаики альтернантеры (ВМАльт, длина вириона ~ 570 nm, диаметр ~ 15 nm) в буферном растворе трисаминометана $((\text{HOCH}_2)_3\text{CNH}_2 \cdot \text{HCl}$, сокращенно Трис-HCl) и вируса со спиральной структурой рода *Potexvirus*, семейства *Alphaflexiviridae* — X-вирус картофеля (ХВК, длина вириона ~ 515 nm, диаметр ~ 13 nm) также в Трис-HCl.

Данные вирусы принадлежат к роду *Potexvirus* и семейству *Alphaflexiviridae* и представляют собой гибкие нитевидные частицы со спиральной структурой [4,7,8]. Суспензии вирусов с концентрацией $C_a = 8.8 \cdot 10^{13} \text{ cm}^{-3}$ (ВМАльт) и $C_x = 6.6 \cdot 10^{13} \text{ cm}^{-3}$ (ХВК) были залиты в идентичные кварцевые кюветы Cell, рабочей длиной 40 mm. Кюветы поочередно размещали на установке (рис. 1). В качестве источника излучения был использован мощный лазер с длительностью импульса 50 ps. Моноимпульсы излучения второй гармоники пикосекундного YAP:Nd-лазера, работающего в режиме

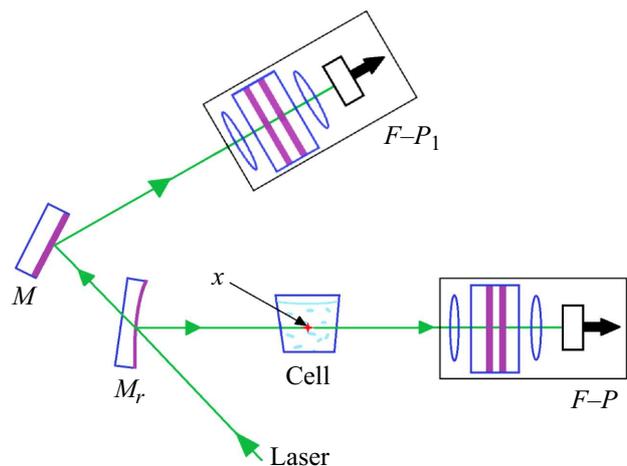


Рис. 1. Принципиальная схема измерений. Laser — направление излучения пикосекундного лазера; Cell — кювета с исследуемым веществом; $F-P$, $F-P_1$ — интерферометры Фабри-Перо с системой регистрации; M — глухое плоское зеркало; M_r — сферическое зеркало ($f \sim 12.5$ cm, коэффициент отражения $\sim 80\%$) x — расположение перетяжки сфокусированного лазерного пучка в середине кюветы.

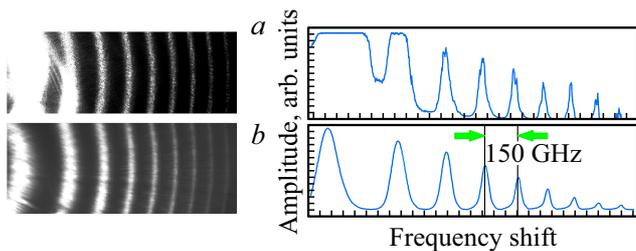


Рис. 2. Интерферограммы рассеянного излучения „вперед“, полученные от интерферометров $F-P$ (в кювете Cell — буферный раствор, a) и $F-P_1$ (спектр излучения лазера, b). Области дисперсии интерферометров одинаковы и равны 150 GHz. Здесь и далее: яркое пятно на интерферограммах рис. 2, a , 3 и 4 вызвано засветкой от компоненты ВКР, возбуждаемой в буферной жидкости.

синхронизации мод (длина волны $\lambda = 540 \text{ nm}$, ширина линии $\delta\nu \sim 1.1 \text{ cm}^{-1}$, длительность импульса $t_p \sim 50 \text{ ps}$, энергия в импульсе E_p до 3.0 мДж) фокусировали сферическим зеркалом M , с фокусным расстоянием $f \sim 12.5 \text{ cm}$ в середину кюветы Cell. Интенсивность лазерного излучения в области каустики в чистой жидкости достигала $\sim 3 \cdot 10^{10} \text{ W/cm}^2$, при этом пробой не наблюдался. Возбуждаемый в кювете сигнал рассеяния вперед и лазерное излучение поступали на интерферометр Фабри-Перо ($F-P$). Часть излучения (около 20%) отводили с помощью зеркала M на контрольный интерферометр $F-P_1$, область дисперсии обоих интерферометров 5 cm^{-1} , или 150 GHz. После интерферометров оптические сигналы поступали на CMOS-камеры и обрабатывались на компьютере в программной среде LABVIEW. Контроль энергии лазерного импульса осуществляли с помощью прибора *Ophyr Vega ROAS* (на схеме рис. 1 не указан), на который поступало 4% лазерного излучения, отраженного от входного окна кюветы Cell. Нестабильность энергии лазерного импульса составляла 1.8–3.0 мДж. Измерения проводились при комнатной температуре.

Результаты и обсуждение

Обнаружены существенные различия спектров низкочастотного вынужденного рассеяния наночастиц вирусов мозаики альтернантеры и X-вируса картофеля в жидкой суспензии при возбуждении мощными лазерными импульсами пикосекундной длительности в диапазоне частотных отстроек $\sim 10\text{--}130 \text{ GHz}$, при этом зарегистрированные собственные частоты вирионов отличаются от ранее зарегистрированных частот этих же вирионов при возбуждении спектров лазерными импульсами наносекундной длительности [4,5]. Различие откликов системы на возбуждение неупругого рассеяния света в суспензиях вирусов для длительности лазерных импульсов $\sim 10 \text{ ns}$ и $\sim 50 \text{ ps}$ может объясняться возбуждением

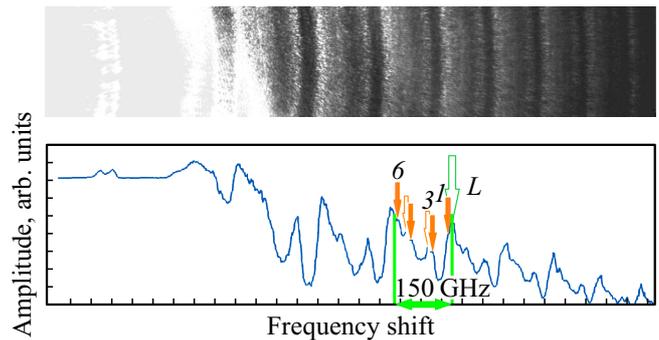


Рис. 3. Интерферограмма рассеянного излучения „вперед“, полученная с использованием интерферометра $F-P$ (в кювете суспензия вируса ВМАльт). Область дисперсии интерферометра 150 GHz. Здесь и далее: L — линия излучения лазера, $1-6$ — нумерация стоксовых линий (величины частотных отстроек см. в таблице).

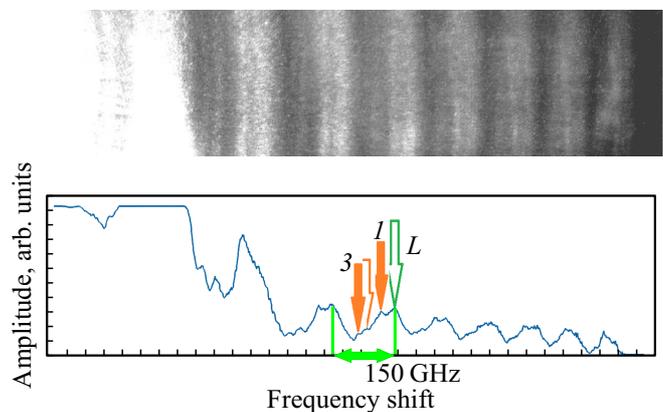


Рис. 4. Интерферограмма рассеянного излучения „вперед“, полученная с использованием интерферометра $F-P$ (в кювете суспензия вируса ХБК). Область дисперсии интерферометра 150 GHz. Здесь $1-3$ — нумерация стоксовых линий.

величины отстроек частоты рассеяния в исследованных суспензиях вирусов (длительность лазерного возбуждающего импульса $\sim 50 \text{ ps}$, ширина лазерной линии $\delta\nu \sim 1.1 \text{ cm}^{-1}$)

Нумерация спектральных линий рис. 3, 4	Сдвиги частоты рассеяния, GHz	
	ВМАльт, GHz	ХБК, GHz
1	11.0	33.7
2	54.7	70.1
3	60.8	87.5
4	96.1	—
5	117.7	—
6	131.7	—

собственных колебательных мод вириона как целого либо отдельных его частей.

В то время как спектр рассеянного излучения буферного раствора (рис. 2, *a* и *b*) не имел выраженных особенностей, в спектрах неупругого рассеяния суспензий вирусов по достижении энергии $\sim 1.6\text{--}2.4$ мДж появились дополнительные линии (рис. 3, 4). Различия в спектрах рассеяния разных образцов показаны в таблице.

Спектры (рис. 3, 4) свидетельствуют, по нашему мнению, о сложной „механической“ структуре вирионов, связанной с неоднородным распределением плотности как вдоль нуклеиновой кислоты (где нуклеотиды имеют различную массу до 30%), так и по объему самого вириона, связанную с наличием регуляторных и структурных функциональных групп, уникальных для каждого вируса. Исходя из сравнения перечисленных результатов и результатов [4], можно допустить наличие двух различных механизмов возбуждения неупругого рассеяния в исследованных суспензиях вирусов. В работах [4,5] спектры были обусловлены вынужденным низкочастотным рассеянием вследствие сфазированного движения вирионов в буферной жидкости, тогда как в данном случае, при пикосекундном возбуждении, полученные частоты принадлежат сфазированным колебаниям отдельных функциональных групп вириона.

Спектры низкочастотного вынужденного рассеяния, возбуждаемые лазерными импульсами наносекундной и/или пикосекундной длительности (таблица, [4,5]), можно использовать при наработке соответствующей базы данных, например для составления „частотного портрета“ вирионов с целью последующей их идентификации.

Финансирование работы

Работа была поддержана грантом РФФИ № 22-22-00153.

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Список литературы

- [1] M.A. Davydov, A.N. Fedorov, L.L. Chaikov, A.F. Bunkin, V.B. Oshurko, S.M. Pershin. JETP Letters, **113** (7), 423 (2021). DOI: 10.1134/S0021364021070055
- [2] O.V. Karpova, M.V. Arkhipenko, S.M. Pershin, M.A. Karpov, A.D. Kudryavtseva, T.V. Mironova, V.I. Savichev, M.A. Shevchenko, N.V. Tcherniega, S.F. Umanskaya. J. of Russian Laser Research, **42**, 106 (2021). DOI: 10.1007/s10946-020-09935-0
- [3] A.F. Bunkin, M.A. Davydov, A.N. Fedorov, M.V. Arkhipenko, V.B. Oshurko, S.M. Pershin. JETP Letters, **113** (11), 733 (2021). DOI: 10.1134/S0021364021110047
- [4] A.F. Bunkin, A.N. Fedorov, M.A. Davydov, M.V. Arkhipenko, N.A. Nikitin. Phys. of Wave Phenomena, **30** (5), 351 (2022). DOI: 10.3103/S1541308X22050028
- [5] A.F. Bunkin, A.N. Fedorov, M.A. Davydov, M.V. Arkhipenko, N.A. Nikitin, S.M. Pershin. JETP Letters, **115** (8), 528 (2022). DOI: 10.31857/S1234567822080109
- [6] Н.В. Литусов. *Общая микробиология (издание второе, исправленное и дополненное)*. Электронное учебное пособие. URL: <https://studfile.net/preview/16442129>
- [7] E.K. Donchenko, E.V. Pechnikova, M.Yu. Mishyna, T.I. Manukhova, O.S. Sokolova, N.A. Nikitin, J.G. Atabekov, O.V. Karpova. PloS One, **12** (8), e0183824 (2017). DOI: 10.1371/journal.pone.0183824
- [8] E. Petrova, N. Nikitin, A. Protopopova, M. Arkhipenko, I. Yaminskii, O. Karpova, J. Atabekov. Biochimie, **95** (12), 2415 (2013). DOI: 10.1016/j.biochi.2013.09.004