

09

Оптическое ограничение мощности суспензиями наноалмазов в D₂O в ближней инфракрасной области

© В.В. Ванюков¹, Г.М. Михеев², Т.Н. Могилева², А.П. Пузырь³,
В.С. Бондарь³, Ю.П. Свирко¹

¹ Институт фотоники, Университет Восточной Финляндии,
80101, Йоэнсуу, Финляндия

² Институт механики УрО РАН, Ижевск, Россия

³ Институт биофизики СО РАН, Красноярск, Россия

E-mail: viatcheslav.vanyukov@uef.fi

Поступило в Редакцию 26 июня 2014 г.

Исследовано оптическое ограничение мощности (ОМ) излучения в интервале длин волн 1400–1675 nm суспензиями детонационных наноалмазов. Показано, что в указанном спектральном диапазоне наносекундных лазерных импульсов эффективность ОМ уменьшается с увеличением длины волны излучения.

Исследование оптического ограничения мощности (ОМ) наноматериалами разной физико-химической природы представляет интерес с точки зрения создания нелинейных оптических фильтров (оптических ограничителей мощности) [1], способных эффективно ослаблять проходящее излучение с целью защиты фоточувствительных оптических приборов, сенсоров, а также глаз. Одним из основных требований к оптическим ограничителям мощности является их способность работать в широком диапазоне длин волн. Именно поэтому внимание ученых в последние годы привлекают наноуглеродные материалы, способные, как известно, поглощать свет в широком диапазоне спектра — от ультрафиолетового до инфракрасного. К настоящему времени опубликовано большое количество работ по исследованию ОМ в суспензиях таких наноуглеродных материалов, как нанотрубки, сажа, графен, наноалмазы и т.д. Было установлено, что доминирующими механизмами ОМ в них являются: нелинейное рассеяние света на паровых пузырьках, сублимация углеродных наночастиц и нелинейное рассеяние на микроплазме [2,3]. Значительная часть этих исследований

проведена на длинах волн первой и второй гармоник YAG : Nd³⁺-лазера. Работ, посвященных исследованию ООМ в ближнем ИК-диапазоне (1100–2500 nm) значительно меньше (см., например, [4–6]), а в суспензиях наноуглеродных структур, насколько нам известно, лишь несколько [7,8]. Это может быть связано с тем, что исследования нелинейного отклика в ИК-диапазоне требуют использования более дорогостоящих и менее распространенных источников лазерного излучения, например, параметрических генераторов света (ПГС). ПГС, накачиваемый первой и второй гармониками YAG : Nd³⁺-лазера, позволяет получать перестраиваемое по частоте излучение в ближней и средней инфракрасной областях спектра. Однако сложность конструкции и дороговизна ПГС являются препятствием для их широкого использования в исследованиях взаимодействия лазерного излучения с веществом. Другой сложностью проведения исследований в ИК-диапазоне является то, что наиболее часто используемые для получения суспензий углеродных наночастиц дисперсионные среды (этанол, толуол, диметилформамид, вода) сильно поглощают инфракрасное излучение [9]. Это затрудняет регистрацию нелинейного сигнала и проведение экспериментов в целом. Тем не менее такие исследования важны для оценки применимости суспензий углеродных наночастиц в качестве оптических ограничителей мощности в ближнем ИК-диапазоне. Это особенно актуально и потому, что в данном диапазоне находится область телекоммуникационных длин волн (1400–1600 nm). Целью данной работы является изучение ООМ в ближнем инфракрасном диапазоне в суспензиях наноалмазов детонационного синтеза (ДНА), обладающих высокой коллоидной стабильностью и устойчивостью [3,10] к многократному воздействию лазерных импульсов с высокой плотностью мощности.

ДНА получали из коммерческого порошка наночастиц, производимого ООО „Реал Дзержинск“ (Россия). Из-за наличия на поверхности широкого спектра химически активных примесей первичные частицы ДНА (средний размер алмазного ядра около 4–5 nm) склонны к агрегации с образованием агрегатов разных размеров. Для уменьшения поверхностных примесей и получения ДНА с высокой коллоидной устойчивостью в деионизованной воде их суспензии подвергали специальной обработке, используя ультразвук и раствор NaCl. По данным дифракционной картины рентгеновских лучей и просвечивающей электронной микроскопии высокого разрешения полученные ДНА не отличаются от общеизвестных детонационных наноалмазов [10]. Водные суспензии ДНА заданной концентрации готовили простым добавлением

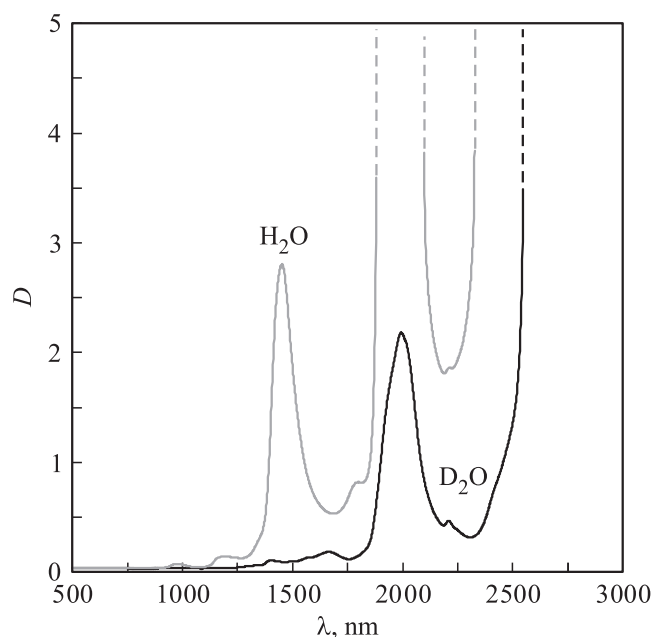


Рис. 1. Спектры поглощения H_2O и D_2O относительно воздуха. Измерения проводились в кварцевой кювете толщиной 10 mm с длиной оптического пути 2 mm.

к навеске порошка наночастиц необходимого объема деионизованной воды без использования ультразвуковой обработки. Полученные водные суспензии ДНА при хранении показали высокую коллоидную устойчивость во времени (более 3 лет). Характеристики ДНА более подробно представлены в нашей работе [10].

В исследованиях использованы суспензии ДНА с концентрацией наночастиц $C = 3$ и $4.5 \text{ wt.}\%$, имеющих средний размер кластеров $d = 110 \text{ nm}$. В качестве дисперсионной среды использовали тяжелую воду (D_2O), так как D_2O в ближней инфракрасной области поглощает свет в значительно меньшей степени, чем дистиллированная вода [11] (рис. 1). Измерения оптической плотности водных суспензий ДНА показали, что в исследуемом спектральном диапазоне с увеличением длины волны излучения поглощение света на частицах ДНА суще-

ственно уменьшается, что согласуется с данными, полученными в работах [12,13].

Эксперименты по изучению ООМ проводили с использованием стандартной техники Z-сканирования с открытой диафрагмой [14]. В таком варианте фотоприемник регистрирует все излучение, проходящее через исследуемый образец, как функцию зависимости от положения образца z относительно положения перетяжки сфокусированного лазерного пучка, принятого за $z = 0$. В экспериментах использовали ПГС (Laser Vision, USA), накачиваемый излучением первой и второй гармоники YAG : Nd³⁺-лазера. Выходное излучение ПГС перестраивали по частоте в диапазонах длин волн 710–885 и 1350–5000 nm. При этом выходное излучение пропускали через пространственный фильтр для получения направленного пучка. Диаметр сфокусированного пучка в области перетяжки, измеренный методом движущегося острого края (см., например, [15]), на длине волны 1500 nm составлял $2w_0 = 60 \mu\text{m}$. Исследования проводили на семи длинах волн $\lambda = 1400, 1450, 1500, 1550, 1600, 1650$ и 1675 nm при фиксированной энергии падающих лазерных импульсов $E_{in} = 0.2 \text{ mJ}$. Частота повторения и длительность импульсов составили 2 Hz и 7 ns соответственно.

Зависимости нормированного коэффициента пропускания T , полученные в ходе сканирования исследуемых суспензий ДНА с концентрациями $C = 3$ и $4.5 \text{ wt.}\%$ вдоль оптической оси для пяти длин волн $\lambda = 1400, 1450, 1500, 1600$ и 1675 nm , представлены на рис. 2. Видно, что при приближении линейной координаты кюветы z к нулю, т.е. при увеличении интенсивности падающих световых импульсов, коэффициент пропускания исследуемых суспензий резко уменьшается. При этом для суспензии с большей концентрацией наночастиц уменьшение нормированного коэффициента пропускания более выражено. Полученные данные согласуются с результатами ранее проведенных нами исследований [16], в которых было показано, что с увеличением концентрации ДНА возрастает число центров рассеяния, ответственных за ООМ в суспензиях ДНА. Из рис. 2 видно, что для обеих зависимостей меньшее оптическое ограничение мощности достигается при длине волны возбуждения 1675 nm, а наибольшее нелинейное ослабление проходящего излучения происходит на длине волны 1400 nm. Таким образом, можно сделать вывод, что эффективность ООМ в суспензиях ДНА в диапазоне 1400–1675 nm уменьшается с увеличением длины волны. В пользу сделанного вывода свидетельствуют также данные (рис. 3) коэффициента ослабления лазерной мощности (η),

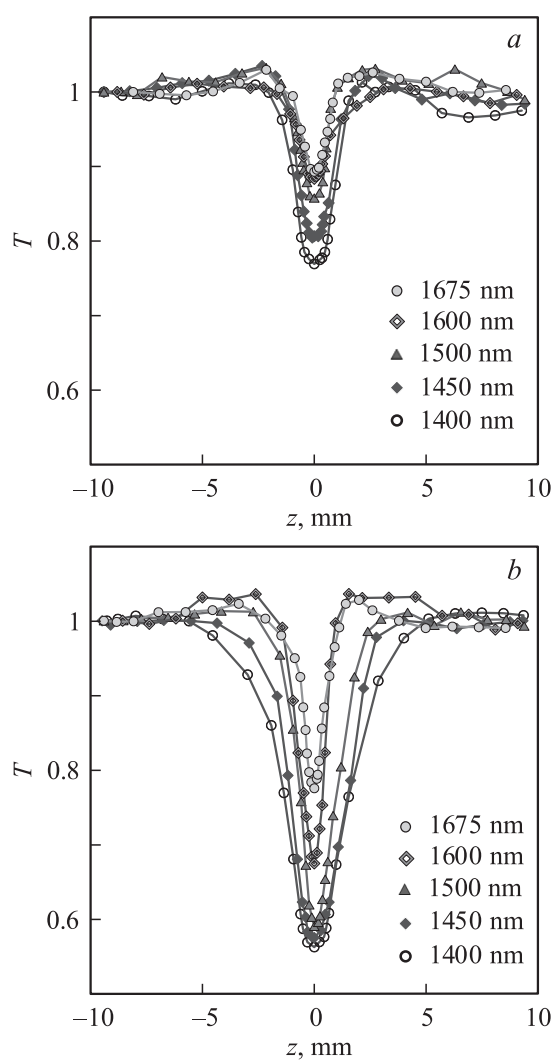


Рис. 2. Зависимость нормированного коэффициента пропускания суспензий ДНА со средним размером кластеров частиц 110 nm в D_2O с концентрациями 3 wt.% (a) и 4.5 wt.% (b) от положения z . Положение $z = 0$ соответствует положению кюветы в фокусе собирающей линзы. Измерения проводились при энергии падающих импульсов 0.2 mJ с длительностью импульсов 7 ns.

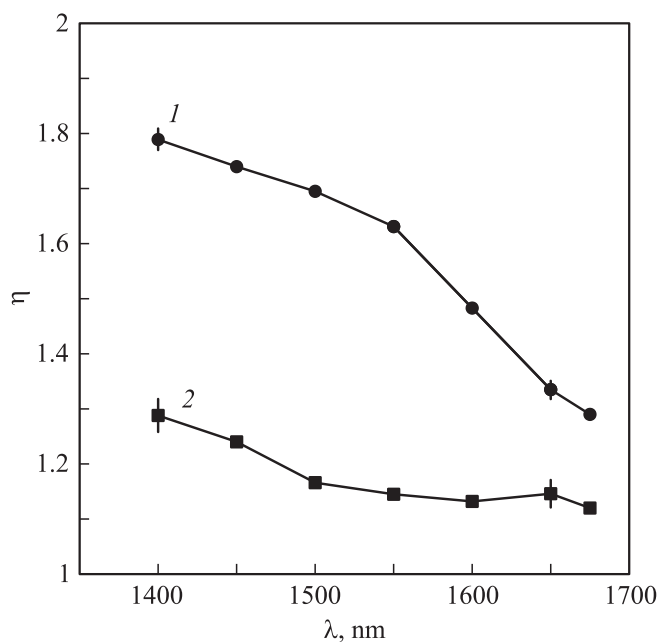


Рис. 3. Зависимость коэффициента ослабления мощности падающего излучения наносекундной длительности суспензиями ДНА в D_2O при концентрациях наночастиц $C = 3$ wt.% (2) и 4.5 wt.% (1), помещенных в кварцевые кюветы с длиной оптического пути 2 mm, от длины волны излучения.

определяемого как отношение линейного коэффициента пропускания к нелинейному $\eta = T_0/T_{nl}(z = 0)$ [17], в зависимости от длины волны лазера. Видно (рис. 3), что с увеличением длины волны излучения в диапазоне 1400–1675 nm коэффициент ослабления, а следовательно, и эффективность ООМ уменьшаются.

Таким образом, впервые показана возможность использования суспензий ДНА в тяжелой воде для ООМ наносекундных лазерных импульсов в интервале длин волн 1400–1675 nm. Установлено, что в указанном спектральном диапазоне эффективность ООМ уменьшается с увеличением длины волны излучения. Суспензии ДНА, для которых ООМ преимущественно обусловлено нарастанием нелинейного рассеяния света, являются перспективным материалом для создания

эффективных ограничителей лазерного излучения, способных работать в широком спектральном диапазоне.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проект № 13-02-96016 р_урал_а), президиума УрО РАН (проект № 12-С-1-1003) и Финской академии наук (грант № 278252).

Список литературы

- [1] *Tutt L.W., Boggess T.F.* // Prog. Quant. Electr. 1993. V. 17. P. 299–338.
- [2] *Vivien L., Riehl D., Hache F., Anglaret E.* // J. Nonlinear Optical Physics & Materials. 2000. V. 9. P. 297–307.
- [3] *Мухеев Г.М., Пузырь А.П., Ванюков В.В.* и др. // Письма в ЖТФ. 2010. Т. 36. В. 8. С. 23–32.
- [4] *Hales J.M., Cozzuol M., Screen T.E.O.* et al. // Optics Express. 2009. V. 17. P. 18 478–18 488.
- [5] *Bouit P.-A., Wetzel G., Berginc G.* et al. // Chem. Mater. 2007. V. 19. P. 5325–5335.
- [6] *He G.S., Yong K.-T., Zheng Q.* et al. // Optics Express. 2007. V. 15. P. 12818–12833.
- [7] *Kamanina N.V., Iskandarov M.O., Nikitichev A.A.* // Optics Communication. 2003. V. 225. P. 337–340.
- [8] *Kamanina N.V., Bagrov I.V., Belousova I.M.* et al. // Optics Communication. 2001. V. 194. P. 367–372.
- [9] *Казицына Л.А., Куплетская Н.Б.* // Применение УФ-, ИК- и ЯМР-спектроскопии в органической химии. М.: Высшая школа, 1971. 264 с.
- [10] *Ванюков В.В., Могилева Т.Н., Мухеев Г.М.* et al. // Applied Optics. 2013. V. 52. P. 4123–4130.
- [11] *Braun C.L., Smirnov S.N.* // J. Chemical Education. 1993. V. 70. P. 612–615.
- [12] *Алексенский А.Е., Вуль А.Я., Коняхин С.В.* и др. // Физика твердого тела. 2012. Т. 54. С. 541–548.
- [13] *Коняхин С.В., Шаронова Л.В., Эйдельман Е.Д.* и др. // Письма в ЖТФ. 2013. Т. 39. В. 5. С. 33–40.
- [14] *Kuzyk M.G., Dirk C.W.* Characterization techniques and tabulations for organic nonlinear materials. Marcel Dekker, 1998. P. 655–692.
- [15] *Khosrofian J.M., Garetz B.A.* // Applied Optics. 1983. V. 22. P. 3406–3410.
- [16] *Могилева Т.Н., Пузырь А.П., Ванюков В.В.* и др. // Нанотехника. 2010. № 4 (24). С. 47–51.
- [17] *Chi S.-H., Hales J.M., Cozzuol M.* et al. // Optics Express. 2009. V. 17. P. 22 062–22 072.