

ПРИМЕНЕНИЕ НАНОТЕХНОЛОГИЙ В ОПТИКЕ: О ВОЗМОЖНОМ УВЕЛИЧЕНИИ ПРОЗРАЧНОСТИ И ПОВЫШЕНИИ ПОВЕРХНОСТНОЙ МЕХАНИЧЕСКОЙ ПРОЧНОСТИ МАТЕРИАЛОВ УФ И ИК ДИАПАЗОНОВ СПЕКТРА

© 2008 г. **Н. В. Каманина**, доктор физ.-мат. наук; **П.Я. Васильев**; **В.И. Студенов**, канд. физ.-мат. наук
 НПК “Государственный оптический институт им.С.И. Вавилова”, Санкт-Петербург
 E-mail: nvkamanina@hotmail.com

Кратко рассмотрены вопросы повышения прозрачности и поверхностной прочности “мягких” материалов УФ и ИК диапазонов (MgF_2 , CaF_2 , BaF_2 , LiF и др.) при использовании нанообъектов. Для матрицы на основе MgF_2 , BaF_2 , LiF установлено существенное изменение в спектрах пропускания в УФ области спектра. Показано также, что прочностные параметры исследуемых материалов могут быть улучшены в 3–10 раз.

Коды OCIS: 310.1620, 310.6860, 160.3710.

Поступила в редакцию 22.07.2008.

В последние 5–10 лет интенсивное развитие нанотехнологий существенно расширяет области применения органических и неорганических материалов, в том числе оптических, и позволяет использовать нанообъекты для модификации и улучшения ряда технических характеристик. Цикл исследований, проводимых нами по оптимизации динамических, спектральных свойств, а также лазерной и механической прочности ряда материалов был представлен в предыдущих публикациях [1–4]. В настоящем кратком сообщении показаны преимущества использования нанообъектов при лазерном напылении на поверхность “мягких” материалов УФ и ИК диапазонов спектра, а также обработки поверхности промежуточных слоев жидкокристаллических структур с нанесенными нанообъектами поверхностной электромагнитной волной (ПЭВ). В результате реализованы увеличение пропускания и повышение поверхностной механической прочности матричных структур, традиционно используемых для целей спектроскопии, лазерной физики, лазерной диагностики и др.

Напыление нанообъектов, в качестве которых были выбраны углеродные нанотрубки или фуллерены, проводилось в вакууме на подложки, нагретые до температуры менее $80\text{ }^\circ\text{C}$, однако стоит сказать, что температурный диапазон выбирался в зависимости от типа обрабатываемого материала. Применялся метод лазерного осаждения нанообъектов; источником излучения служил квазинепрерывный щелевой CO_2 -лазер с p -поляризованным излучением на длине волны $10,6\text{ }\mu\text{m}$ мощностью 30 Вт . В зависимости от материала подложки проводилась дополнительная обработка матричной структуры поверхностной электромагнитной волной.

На рис. 1–3 приведены УФ спектры пропускания подложек из материалов MgF_2 , BaF_2 , LiF , которые используются в лазерной оптике, например, в качестве матричных элементов для создания пассивных лазерных затворов или в качестве выходных окошек ламп УФ диапазона. Указанные в данной работе спектры измерены на спектрофотометре СФ-26 в диапазоне $190\text{--}450\text{ нм}$. Образцы, чистый и обработанный с применением новой нанотехнологии (1 и 2 соответственно), ставились в оправу, и измерения пропускания проводились одновременно для обоих образцов на каждой длине волны. В диапазоне $200\text{--}400\text{ нм}$ пропускание образцов исследуемых материалов увеличилось на 3–10%, что регистрируется уже при односторонней обработке подложки. Заметим, что возможно еще некоторое

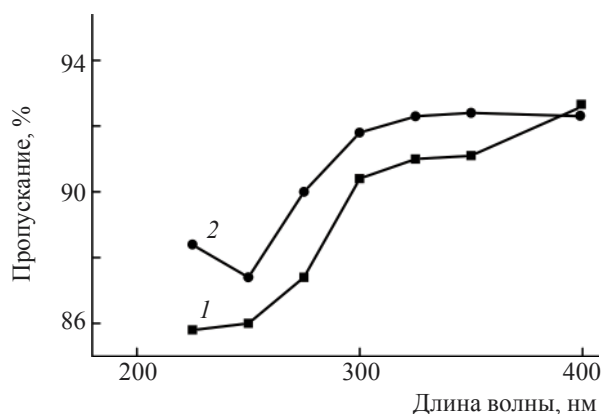


Рис. 1. Спектральные характеристики образцов MgF_2 . 1 – без обработки, 2 – после нанопереработки. Диаметр образцов 30 мм , толщина 1 мм .

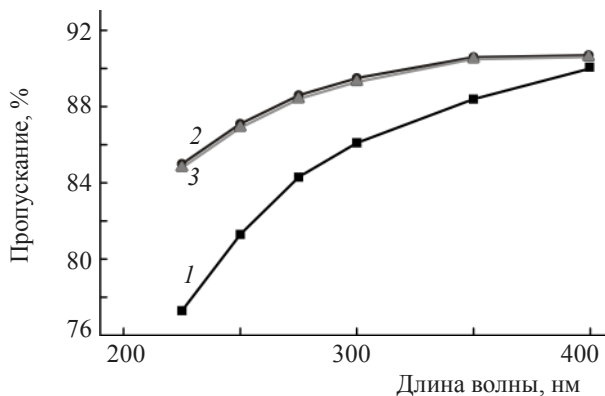


Рис. 2. Спектральные характеристики образцов BaF_2 . 1 – без обработки, 2 и 3 – после нанообработки. Толщина образцов 1,86, 1,83, 1,86 мм соответственно.

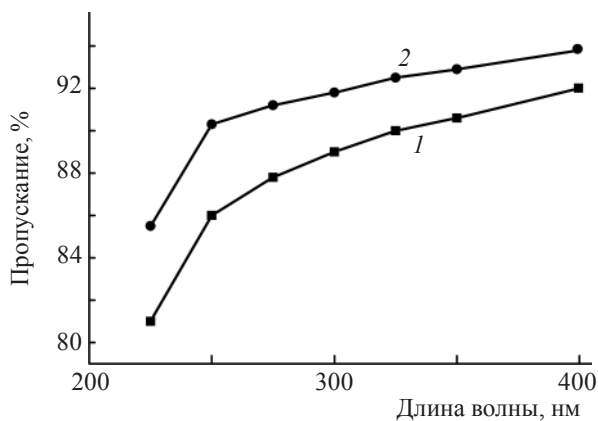


Рис. 3. Спектральные характеристики образцов LiF . 1 – без обработки, 2 – после нанообработки. Диаметр образцов 30 мм, толщина 2 мм.

увеличение прозрачности изучаемых материалов в указанном спектральном диапазоне при двукратной обработке поверхности MgF_2 , BaF_2 , LiF . Регистрируемое “просветление” исследуемых систем, особенно проявляющееся в УФ области спектра, обусловлено физико-химическими особенностями применяемых нанообъектов и условиями лазерной обработки. Возможный механизм “просветления” в УФ области может быть связан с изменением показателя преломления материала, что не противоречит полученным данным квантово-химических расчетов, показывающих возможность даже химической связи между нанотрубкой и фторидами; расчет был сделан для системы MgF_2 –углеродная нанотрубка. Один из вариантов “привязки” углеродных

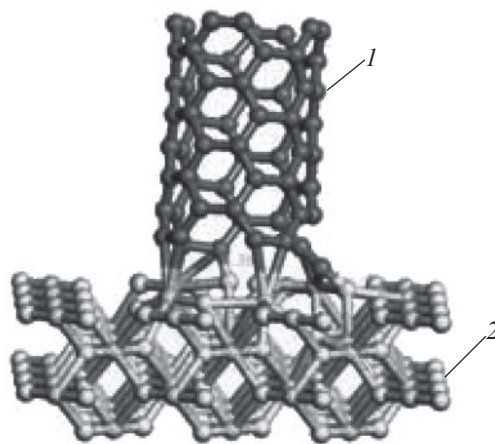


Рис. 4. Модель привязки углеродной нанотрубки к поверхности фторида магния. 1 – нанотрубка, 2 – поверхность MgF_2 .

нанотрубок к поверхности фторида магния показан на рис. 4.

В табл. 1 приведены выборочные результаты исследований абразивной механической прочности (прочности на истирание образцов) отдельных обработанных материалов. Эти данные были получены по методике, описанной в работе [5] (по исследованию сцепления с подложкой оптических покрытий, проверяемых на твердость при процарапывании). Исследования проводились на приборе СМ-55 (разработка ГОИ им. С.И. Вавилова) при нагрузке на индентор 100 г. Видно, что абразивная прочность “мягких” материалов УФ и ИК диапазонов спектра существенно возрастает при применении разрабатываемых нанотехнологий. Действительно, при одинаковых условиях эксперимента наблюдается увеличение абразивной прочности в

Таблица 1. Результаты исследования поверхностной механической прочности ряда материалов УФ и ИК диапазона спектра

Материал	Число оборотов на истирание, выдерживаемое образцом (абразивная прочность) до появления отчетливого кольца	
	Исходный образец	Исходный образец + нанообработка
Органическое стекло, чистое	200–400	1500–3000*
BaF_2	200	3000
CaF_2	500	3000
MgF_2	1000	3000
$ZnSe$	2500	2700–3000

* 3000 оборотов соответствуют нулевой прочности, что по твердости присуще оптическому стеклу К8.

несколько раз. Механизм упрочнения материалов при использовании нанобъектов, а также лазерной обработки изучается нами достаточно скрупулезно, и в последующих публикациях будет предложено его рассмотрение на основе более детальных квантово-химических методов. Основная идея связана со встраиванием прочных С–С связей от используемых нанобъектов, например, на основе нанотрубок в “мягкую” решетку изучаемых материалов.

В табл. 2 приведены сравнительные данные, полученные на основе методов атомно-силовой микроскопии (АСМ) при изучении шероховатости поверхности образцов из MgF_2 (исследовался участок размером 5000×5000 нм). Шероховатость была определена по изучению непосредственно профиля поверхности. Анализируя данные табл. 2, можно сказать, что проведение нанообработки при использовании нанобъектов улучшает поверхность изучаемого материала по всем параметрам, характеризующим ее шероховатость (максимальное R_{max} , среднее R_a или R_{mean} и среднеквадратическое S_q значения). Действительно, были улучшены характеристики как по наиболее часто используемой среднеквадратической шероховатости S_q , измеряемой как среднее значение из абсолютных значений выступов на поверхности, измеренных от среднего уровня поверхности [6], так и улучшен параметр по средней шероховатости R_a , обычно применяемый для оценки шероховатости поверхностей, подвергнутых механической обработке. Таким образом, обработка поверхности подложки MgF_2 нанобъектами приводит к существенно лучшему и ровному рельефу, чем было до таковой. Происходит “зашлифовывание” трещинок, уменьшение числа бороздок, царапин и других дефектов структуры поверхности материала при нанесении нанобъектов, нивелируется также часть выступов, имеющих размеры, близкие к размерам используемых нанобъектов, например, нанотрубок с диаметром 5–10 нм и длиной 10–100 нм.

Применение ПЭВ позволило нам решить еще одну из задач, актуальных при эксплуатации про-

Таблица 2. Результаты исследования шероховатостей поверхности матричного материала из MgF_2 до и после нанообработки

Параметры шероховатости	Значения шероховатости участка на образце	
	без обработки	после обработки ПЭВ
R_{max}	67,4	26,6
R_{mean}	36,8	16,3
R_a	6,2	2,7
S_q	8,4	3,6

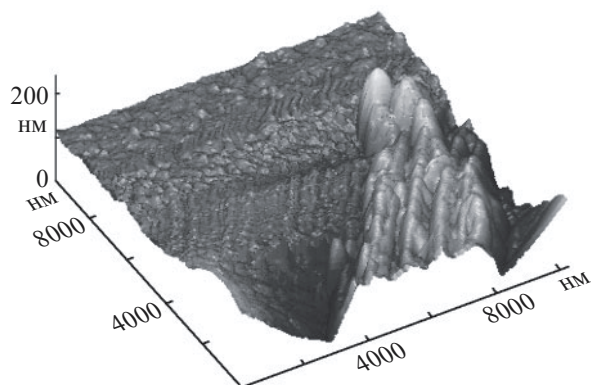


Рис. 5. АСМ-изображение рельефа для ориентирования ЖК-молекул новым методом.

странственно-временных модуляторов света на основе жидких кристаллов (ЖК), а именно: существенно снизить напряжение питания, прикладываемого к ЖК-ячейке, работающей в схеме “на пропускание”. На рис. 5 приведена АСМ-фотография рельефа поверхности раздела твердое тело–ЖК, используемой как в качестве прозрачного проводящего покрытия, так и в качестве ориентирующего ЖК-молекулы слоя. Установлены следующие преимущества данной нанообработки:

- 1) снижение емкости границы раздела, что привело к уменьшению времен релаксации ЖК-мезофазы;
- 2) возможность ориентирования ЖК-молекул без непосредственного ориентирующего слоя;
- 3) уменьшение общего числа слоев в сложной сэндвич-структуре ЖК-ячейки;
- 4) уменьшение практически в 2 раза амплитуды импульса прикладываемого напряжения питания;
- 5) повышение на 10–15% прозрачности проводящих слоев по сравнению с ранее используемыми покрытиями на основе окислов индия и олова;
- 6) уменьшение стоимости ЖК-элементов в связи с отсутствием необходимости применения технологии нанесения ориентантов, его сушки и нитирования;
- 7) увеличение практически в 3–5 раз лазерной прочности покрытий за счет большого числа связей С–С у слоев с нанобъектами, сравнимых по прочности с алмазоподобными пленками.

Итак, в данном исследовании показаны возможность использования нанобъектов для увеличения пропускания и упрочнения матричных материалов УФ и ИК диапазонов спектра, традиционно используемых для целей спектроскопии и лазерной физики, а также пути усовершенствования технологии создания ЖК-элементов с новым способом обработки границы раздела фаз твердое тело–ЖК. Данное ис-

следование выполнено в лаборатории “Фотофизика фуллеренсодержащих сред и голографических технологий” ФГУП НПК “ГОИ им. С.И. Вавилова. Работа выполнена при частичной поддержке гранта РФФИ № 08-02-00966 (2008–2010 гг.), а также гранта МНТЦ ИРР А-1484 (2007–2009 гг.). Авторы благодарят сотрудников ФГУП НПК “ГОИ им. С.И. Вавилова” Ю.А. Гоголева, И.А. Малышева, А.Ф. Андреева за дискуссии и комментарии по проводимым исследованиям. Авторы благодарят Е.Ф. Шека (Москва, Черноголовка) и Е.А. Никитину (Москва, Институт прикладной механики РАН) за проведенный анализ квантово-химического моделирования, а также выражают признательность В.Е. Левинок и А.П. Кулешову за консультации и помощь в измерениях абразивной прочности, а сотруднику СПбГТУ ИТМО Ю.М. Воронину за помощь в проведении исследований на атомно-силовом микроскопе.

ЛИТЕРАТУРА

1. Каманина Н.В. Фуллеренсодержащие диспергированные нематические жидкокристаллические структуры: динамические характеристики и процессы самоорганизации // УФН. 2005. Т. 175. № 4. С. 445–454.
2. Васильев П.Я., Каманина Н.В. Перспективы использования прозрачных проводящих покрытий с фуллеренами и нанотрубками для дисплейных элементов нового поколения // Письма в ЖТФ. 2007. Т. 33. В. 18. С. 8–13.
3. Kamanina N.V., Vasilyev P.Ya., Vangonen A.I., Studeonov V.I., Usanov Yu.E., Kajzar F., Attias A.-J. Photophysics of organic structures doped with nanoobjects: optical limiting, switching and laser strength // Mol. Cryst. Liq. Cryst. 2008. V. 485. P. 203–212.
4. Каманина Н.В., Васильев П.Я., Студенов В.И., Усанов В.И. Упрочнение прозрачных проводящих покрытий и “мягких” материалов ИК диапазона спектра при применении нанотехнологий // Оптический журнал. 2008. Т. 75. № 1. С. 83–84.
5. Рождественский В.Н. “Об оценке твердости оптических покрытий” // ОМП. 1996. Т. 33. № 12. С. 54–56.
6. Bennet J.M., Mattsson L. Шероховатость поверхности и рассеяние. Optical Society of America / Перевод с англ. Н.В. Васильченко. СПб.: ГОИ им. С.И. Вавилова. 1993. 119 с.