

**ПАВЕЛ ВИКТОРОВИЧ КУЖАКОВ**аспирант отдела фотофизики сред с нанобъектами, Государственный оптический институт им. С. И. Вавилова (Санкт-Петербург, Российская Федерация)  
*kpv\_2002@mail.ru***НАТАЛИЯ ВЛАДИМИРОВНА КАМАНИНА**доктор физико-математических наук, начальник отдела фотофизики сред с нанобъектами Государственный оптический институт им. С. И. Вавилова (Санкт-Петербург, Российская Федерация)  
*nvkamanina@mail.ru***ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ РЕЗУЛЬТАТА НАНОСТРУКТУРИРОВАНИЯ ПОВЕРХНОСТИ НА СПЕКТР ОТРАЖЕНИЯ И МИКРОТВЕРДОСТЬ КВг И ВаF<sub>2</sub>\***

Рассмотрено влияние поверхностного структурирования углеродными нанотрубками «мягких» материалов УФ- и ИК-диапазонов спектра (КВг и ВаF<sub>2</sub>) на спектральные характеристики. Дискутируется наличие процесса корреляции между спектральными и прочностными параметрами изучаемых материалов, дается прогноз по их возможному использованию.

Ключевые слова: углеродные нанотрубки, наноструктурирование, «мягкие» оптические материалы

Наряду с классическими оптическими материалами и методами расчета их характеристик [1], [5], [6], в последнее время большое внимание уделяется изучению влияния процесса наноструктурирования, в том числе углеродными нанотрубками, с целью модификации объемных и поверхностных свойств «мягких» материалов УФ- и ИК-диапазонов оптического спектра. К группе «мягких» материалов зачастую относят неорганические структуры на основе фторидов бария, кальция, магния, хлоридов натрия и калия, бромида калия и др. Данные системы без модификации их свойств разными методами упрочнения по критерию проявления именно прочностных характеристик (прочность на истирание, микротвердость и др.) сравнимы с таковыми параметрами для органических пластических материалов. В данной статье исследуется влияние углеродных нанотрубок (УНТ) на спектр отражения оптических материалов: бромида калия КВг и фторида бария ВаF<sub>2</sub>, а также на их прочностные параметры. В качестве метода нанесения углеродных нанотрубок использовался метод, описанный в работах [3], [7]. Формирование слоя на границе раздела «поверхность материала – углеродная нанотрубка» позволяет несколько уменьшить потери Френеля в силу малости показателя преломления углеродных нанотрубок  $n = 1,1$ ; потери Френеля могут быть изменены от единиц процентов (~4 и 8 % от одной до двух необработанных поверхностей оптического материала КВг или ВаF<sub>2</sub>) до долей процентов (0,2 и 0,4 % от одной и двух обработанных поверхностей соответственно).

Для нормального падения света коэффициент отражения дается известным соотношением [2]:

$$R_{12} = [(n_2 - n_1) / (n_2 + n_1)]^2. \quad (1)$$

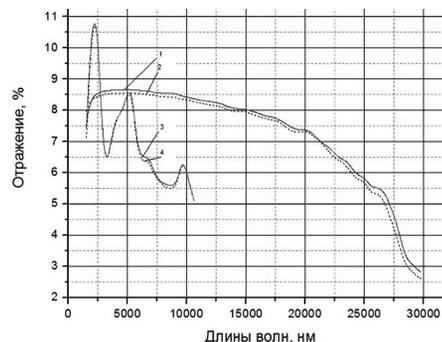
На границе раздела сред «воздух – образец» бромида калия при коэффициенте преломления воздуха  $n_1 = 1$  и коэффициенте преломления КВг в рабочей области, например, 1,014 мкм  $n_2 = 1,54425$  отражение составит 4,51 % без нанесенных нанотрубок.

Зададим показатель преломления  $n_2$  с учетом таковой величины для углеродных нанотрубок, то есть введем  $n_3 = 1,1$ :

$$R_{12} = [(n_3 - n_1) / (n_3 + n_1)]^2. \quad (2)$$

В этом случае теоретически получаем коэффициент отражения 0,22 % при осаждении наноструктур на поверхность подложки.

Для экспериментальной проверки данного факта было проведено лазерное напыление УНТ в смеси с углеродными нановолокнами и собрана экспериментальная установка для проверки уменьшения коэффициента отражения. На рисунке приведены экспериментально полученные спектры отражения для материалов на основе КВг и ВаF<sub>2</sub> до и после нанесения углеродных нанотрубок.



Спектр отражения оптических материалов КВг, ВаF<sub>2</sub> в инфракрасной области спектра (2000–30 000 нм): 1 – чистый КВг, 2 – наноструктурированный КВг, 3 – чистый ВаF<sub>2</sub>, 4 – наноструктурированный ВаF<sub>2</sub>

Параллельно спектральным измерениям были сделаны эксперименты по определению микротвердости КВг и ВаF<sub>2</sub> до и после нанесения углеродных нанотрубок; использовался микротвердомер ПМТ-3М (разработки ОАО «ЛЮМО», Санкт-Петербург). Данные приведены в таблице. Сравнительные данные по микротвердости для чистых и наноструктурированных образцов КВг (нагрузка на индентор 10 г) и ВаF<sub>2</sub> (нагрузка на индентор 20 г)

Изучаемая система	Микротвердость*, Па × 10 <sup>9</sup>	Относительное увеличение микротвердости, %
Чистая матричная структура КВг	0,0087 ± 0,0001	6,1
Наноструктурированный КВг	0,0092 ± 0,0001	
Чистая матричная структура ВаF <sub>2</sub>	0,078 ± 0,002	15,8
Наноструктурированный ВаF <sub>2</sub>	0,090 ± 0,005	

\* Среднее значение микротвердости было определено по 10 измерениям.

Итак, уже на первом этапе изучения влияния наноструктурирования на КВг и ВаF<sub>2</sub> можно сделать следующие выводы.

1. Процесс наноструктурирования КВг, ВаF<sub>2</sub> в ИК-диапазоне не всегда однозначно приводит к существенному изменению спектра отражения на разных длинах волн. Однако в указанном спектральном диапазоне (см. рисунок) получено небольшое изменение в спектре отражения. Наблюдаемый выигрыш при наноструктурировании поверхности, например, образцов КВг (с толщиной 6,08 мкм), по результатам проведенных исследований в инфракрасной области спектра, составляет ~0,1 %, а для образцов ВаF<sub>2</sub> (с толщиной 3,2 мкм) ~0,1 %. Погрешность измерений на указанной установке составляла ~0,01 %, что бывает необходимым при реше-

нии таких, например, задач, как регистрация слабых сигналов фоточувствительными датчиками, защищенными «мягкими» оптическими материалами. Малое изменение в коэффициенте отражения, по-видимому, возможно объяснить двумя причинами: во-первых, использованием смеси углеродных наноструктур, а не одностенных УНТ, дающих рельеф с уменьшением шероховатости поверхности вдвое; во-вторых, тем фактом, что при диаметре нанотрубок и нановолокон в диапазоне 6–10 нм возможно попадание приповерхностных слоев матричного материала при частичной лазерной абляции внутрь нанотрубок, как было показано ранее для других систем в работе [4], что нивелирует ожидаемую разницу в показателях преломления и влияет на малые изменения в потерях на отражение; в-третьих, поскольку основным элементом приставки зеркального отражения является призма, обеспечивающая отражение света от поверхности анализируемого образца под определенным углом, нельзя отрицать тот факт, что, возможно, угол подобран для данного спектрального диапазона не совсем точно.

2. Очевидно, что выбор типа углеродных наноструктур, а также первичная обработка поверхности данных матричных материалов (шлифовка, полировка и др.), еще до проведения процесса лазерного нанесения с последующим ориентированием углеродных наноструктур в электрическом поле существенна для получения соответствия между теоретическими расчетами и экспериментальными данными по изучению потерь на отражение.

## БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы благодарят В. Е. Ваганова и И. В. Мишакова, а также выражают признательность П. Я. Васильеву, В. И. Студёнову (ФГУП «НПК «ГОИ им. С. И. Вавилова») и Н. Н. Рожковой (КарНЦ РАН, г. Петрозаводск).

\* Работа была поддержана грантом РФФИ № 10-03-00916, а также ФЦП НТБ программой, проект «Модулятор с ПЭВ».

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Альперович Л. И. Метод дисперсионных соотношений и его применение для определения оптических характеристик. Душанбе, 1973. 46 с.
2. Воронкова Е. М., Гречушников Б. Н., Дистлер Г. И., Петров И. П. Оптические материалы для инфракрасной техники. М.: Наука, 1965. 236 с.
3. Каманина Н. В., Васильев П. Я., Студенов В. И. Особенности наноструктурированных покрытий при использовании лазерной технологии и ориентированных углеродных нанотрубок // Письма в ЖТФ. 2011. Т. 37. Вып. 3. № 1. С. 23–29.
4. Каманина Н. В., Лихоманова С. В., Васильев П. Я., Студёнов В. И., Чернозатонский Л. А., Ваганов В. Е., Мишаков И. В. Изменение поверхностных свойств тонкопленочных поляризаторов с углеродными наноструктурами // Письма в ЖТФ. 2011. Т. 37. Вып. 24. С. 49–56.
5. Погребняк А. Д., Шпак А. П., Азаренков Н. А., Бересков В. М. Структура и свойства твердых и сверхтвердых нанокompозитных покрытий // Успехи физических наук. 2009. Т. 179. № 1. С. 3–64.
6. Уханов Ю. И. Оптические свойства полупроводников. М.: Наука, 1977. 366 с.
7. Kamaniina N. V., Bogdanov K. Yu., Vasilyev P. Ya., Studeonov V. I., Pujsha A. E., Shmidt A. V., Krestinin A. V., Kajzar F. Nanoobjects – Containing Structures for Aerospace and Laser Switching Systems // Nonlinear Optics and Quantum Optics. 2010. Vol. 40. P. 277–285.