

Широкополосное антиотражающее композитное покрытие: влияние импульсной лазерной обработки на оптические свойства

© Ф.Ф. Комаров¹, М.Н. Жукова^{1,*}, О.В. Мильчанин¹, О.Р. Людчик²

¹ НИИ прикладных физических проблем им. А.Н. Севченко БГУ, Минск, Беларусь

² Белорусский государственный университет, Минск, Беларусь

e-mail: maryliss.lab@gmail.com

Поступила в редакцию 12.03.2024 г.

В окончательной редакции 25.04.2024 г.

Принята к публикации 20.05.2024 г.

Продемонстрирован разработанный метод лазерной обработки для формирования антиотражающих покрытий на основе композитных материалов, создаваемых путем наполнения эпоксидного полимера многостенными углеродными нанотрубками. Исследовано влияние профилирования поверхности композитных материалов импульсной лазерной обработкой на отражательную способность в УФ, видимом и ИК диапазонах длин волн (0.2–25 μm). Создан композитный материал и на нём сформированы структуры с низким коэффициентом отражения в указанном диапазоне длин волн. Оптические характеристики таких структур соответствуют стандартным требованиям к антиотражающим покрытиям оптоэлектронных и оптических систем авиакосмических аппаратов.

Ключевые слова: многостенные углеродные нанотрубки, эпоксидный полимер, композитный материал, структурирование, импульсная лазерная обработка, широкополосное антиотражающее покрытие.

DOI: 10.61011/OS.2024.06.58645.6139-24

Введение

Большое внимание привлекают материалы, слабо отражающие в широком спектральном диапазоне электромагнитного излучения (ЭМИ). Они широко используются в качестве покрытий в оптических и оптоэлектронных системах авиакосмической техники, элементах солнечной энергетики, системах термо- и фотодетекторов, для обеспечения незаметности в военной технике, в частности в беспилотных летательных аппаратах. В литературе можно найти много вариантов уменьшения отражательной способности материала [1–6], например, путем добавления в его структуру поглощающих веществ, таких как красители, частицы углерода, золото и частицы платиновой черни [1,7–10]. Следует отметить, что большие ограничения на долю падающего излучения, которая может быть поглощена, накладывает граница раздела воздух/поверхность. Для решения этой задачи и минимизации отражения падающего излучения на поверхности композитного материала создается антиотражающий слой путем формирования субволновых неоднородностей [11–15]. В этом случае коэффициент преломления ЭМИ в приповерхностной области слоя и сопряженной области воздуха (вакуума) близки по величине (~ 1.0 – 1.1).

В современном мире используется широкая гамма физических и химических процессов изготовления слабо отражающих покрытий, включая ряд методов осаждения и выращивания массивов углеродных нанотрубок (УНТ) [10], ионно-плазменное травление [3–5,12,14,15],

литографические методы [13], осаждение покрытий на основе аэрогелей низкой плотности и иных пористых покрытий [1,16] и выращивание массива вертикально ориентированных углеродных нанотрубок [6,10,17–19].

Следует отметить, что подражание природным принципам функционирования экстремально черных и антиотражающих систем живых организмов, сформированных в процессе их эволюции на протяжении миллионов лет, позволило создать ряд эффективных антиотражающих покрытий [19–23]. Особенно это относится к структурированным покрытиям, реализованным на принципах „глаза моли“ (moth eye) [19,22,23] или „крыла бабочки“ (butterfly wing) [21]. С точки зрения оптических характеристик в настоящее время наиболее эффективными антиотражающими системами в широком спектральном диапазоне от видимого до дальнего ИК являются покрытия на основе массивов вертикально ориентированных УНТ (vertically aligned nanotube array (VANTA)) [10,17,24]. Коэффициент преломления материала VANTA на воздухе близок к единице, а его мнимая часть значительно меньше единицы [10]. Такой материал можно считать композитом, состоящим из слабо отражающего материала и воздуха.

Однако в промышленных масштабах данные методы невозможно использовать в связи с рядом недостатков каждого. В материалах, формируемых ионным и плазменным травлением, не удаётся достичь достаточного контроля для равномерного воспроизведения структуры на больших площадях. Аэрогели обладают небольшой

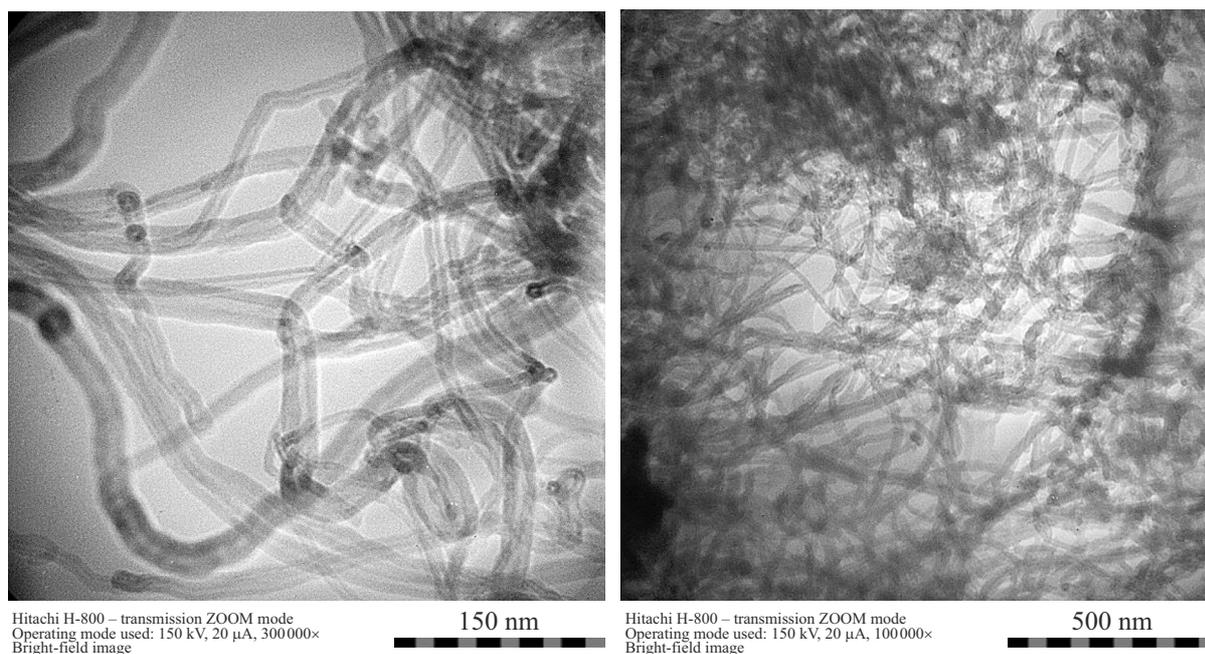


Рис. 1. ПЭМ-микрофотографии структуры МУНТ „Таунит-М“ (слева) и сформированного композита (справа).

механической стойкостью и актуален вопрос токсикологического влияния продуктов при их производстве. Для массивов вертикально выращенных методом CVD одностенных углеродных нанотрубок (ОУНТ) на подложках с металлом катализатором, обладающих высокими антиотражающими свойствами в широком спектральном диапазоне [6,17,19], главным минусом является сложность технологического процесса их выращивания и низкая механическая прочность формируемых систем. Печатный литографический способ с использованием специальных мастер-форм — хорошо апробированный и достаточно простой метод, не требует дорогостоящего технологического оборудования. Однако изготовление мастер-форм, обеспечивающих изменение топологии поверхности материала, занимает продолжительное время, поэтому является недостатком, из-за невозможности задать требуемые параметры поверхности покрытий одномоментно.

В настоящей работе рассмотрен метод структурирования поверхности для создания антиотражающих покрытий посредством использования импульсного лазерного излучения. Идея заключается в формировании периодической структуры на поверхности исходного материала путем сканирования лазерным пучком по заданной программе с удалением части материала. Такой способ обеспечивает контролируемое управление геометрическими размерами создаваемых бороздок (ширина, глубина, степень шероховатости стенок) и расстоянием между ними. Композит создавался на основе эпоксидного полимера с наполнением его определённой концентрацией многостенных углеродных нанотрубок (МУНТ). Графеноподоб-

ные структуры МУНТ обеспечивают высокую эффективность поглощения ЭМИ и возможность формировать в используемом полимере объёмные поглощающие сетки [15]. Следует отметить и невысокую стоимость МУНТ по отношению к стоимости одностенных УНТ.

Методика эксперимента

Процесс создания структурированного покрытия, характеризующегося низким коэффициентом поглощения, включал две основные процедуры: изготовление композитного образца на основе полимера с добавлением МУНТ и затем лазерную обработку поверхности композитного образца. Для работы было подготовлено 6 типов образцов. За полимерную основу была взята эпоксидная смола ЭД-20. В качестве добавки выступали углеродные нанотрубки производства ООО „НаноТехЦентр“ (г. Тамбов, Россия) с названием „Таунит-М“. Данные многостенные углеродные нанотрубки обладают внутренним диаметром 5–10 nm, внешним диаметром 10–30 nm и длиной от 1 до 10 μ m (рис. 1), геометрическая поверхность составляет $> 160 \text{ m}^2/\text{g}$, термостабильность — до 600°C [25].

Подготовку самого композита можно разделить на 3 основных этапа.

1) Предварительное ультразвуковое диспергирование многостенных углеродных нанотрубок с концентрацией 4 wt.% в спиртовом растворе ПАВ (100 mM), для „распутывания“ их из клубков УНТ и предотвращения образования кластеров, а также для равномерного распределения нанотрубок по объёму композита. Для

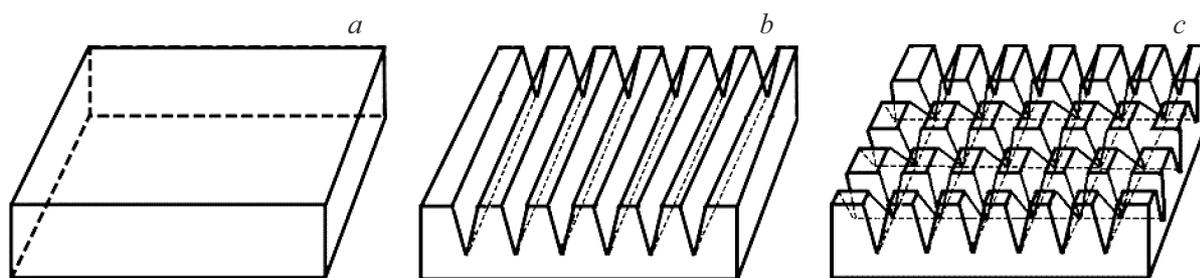
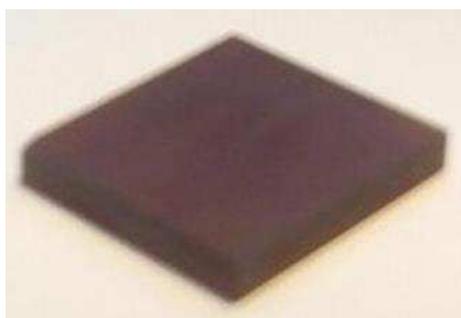
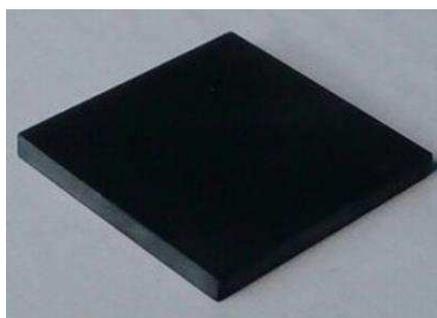


Рис. 2. Схематическое изображение топологий поверхностей образцов: (a) топология исходных образцов, (b) топология образцов с продольным профилированием, (c) топология образцов с профилированием сеткой.



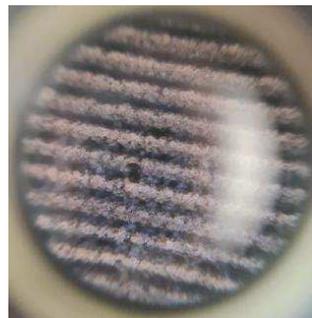
1, a



1, b



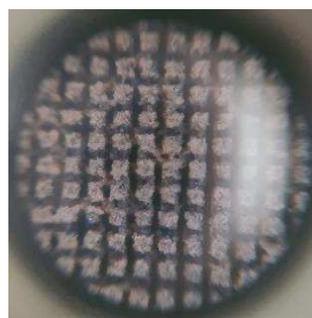
2, a



2, b



3, a



3, b

Рис. 3. Фотографии изготовленных полимерных образцов: 1, a — исходного полимера, 1, b — полимер с наполнением 4 wt.% УНТ „Таунит-М“, 2, a, b — композит со структурированной поверхностью в виде бороздок, $E_p = 12.5$ J, 3, a, b — композит со структурированной поверхностью в виде пирамидок, $E_p = 12.5$ J.

диспергирования раствора применялся ультразвуковой гомогенизатор UP-400St. Процесс производился на частоте 24 kHz с выделяемой мощностью от 40 W до 80 W,

при постепенном повышении мощности от минимальной до максимальной с целью минимизации дефектообразования в УНТ и дробления их.

2) Далее полученный раствор замешивали к эпоксидному полимеру и вновь подвергали ультразвуковой обработке.

3) На конечном этапе после продолжительного диспергирования (15–30 min) к раствору добавлялся отвердитель, и готовый образец полимеризовался в сушильной камере при температуре 65–70°C.

Профилирование поверхности производилось импульсным Nd:YAG-лазером с частотой 50 Hz и длиной волны 1064 nm. Из-за недостаточной мощности лазера (до 100 mW) для прожигания канавки необходимой глубины за один проход по поверхности производилось многократное прохождение по одному и тому же участку для достижения нужных размеров канавок. В качестве факторов, управляющих антиотражающими свойствами поверхности композита, выбирались: энергия накачки E_p , частота импульсов f , расстояние между канавками h и параметры фокусировки лазерного пучка (на поверхность или вглубь объекта). Эти факторы обеспечивают контролируемое управление геометрическими размерами и формой канавок, а также топологией стенок их. Для формирования периодической структуры были выбраны параметры, обеспечивающие наибольшую глубину, наиболее ровную границу композит-воздух, а также наименьшую ширину основания полостей — $E_p = 12.5$ и 13 J, фокусировка пучка на глубине образца и на его поверхности, шаг между бороздками $h = 100$ и $400 \mu\text{m}$. После прожига всех дорожек на образце необходима процедура очистки канавок от пыли и частиц распыленного композита, скопившихся во время процесса профилирования. Так как канавки расположены очень близко друг к другу и имеют небольшие размеры, очистка от продуктов эрозии приповерхностной области производилась методом выдувания потоком воздуха под некоторым давлением.

Структурные характеристики исходных МУНТ, распределение массива углеродных нанотрубок в полимерной матрице и морфология поверхности исходного и обработанного лазером композита определялись методом просвечивающей и сканирующей электронной микроскопии с использованием электронного микроскопа Hitachi H-800 и микроскопа Hitachi H-8010 соответственно. Коэффициент отражения модифицированного композита в спектральном диапазоне от 0.2 до $2.5 \mu\text{m}$ регистрировался на спектрофотометре Lambda1050 с приставкой зеркального отражения и в диапазоне 2.5 – $25 \mu\text{m}$ на фурье-спектрофотометре Spectrum 3 Optica.

Результаты и обсуждения

На рис. 1 представлены ПЭМ-изображения массива исходных УНТ „Таунит-М“, а также образца композиционного материала, наполненного 4 wt.% нанотрубок „Таунит-М“. На представленном ПЭМ-микроразображении композита обнаруживается сформированная при изготовлении его трехмерная сетка из

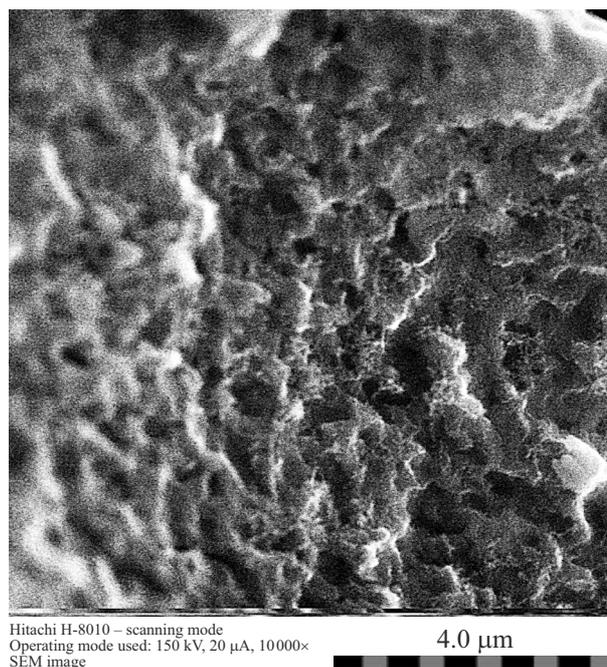


Рис. 4. СЭМ-изображение поверхности боковой стенки канавки композитного материала после лазерной обработки.

переплетенных УНТ и полимерная сетчатая структура с ячейками размером ~ 10 nm. Формирование трехмерной сетки в объеме полимера соответствует появлению неоднородных локальных областей, сильно отличающихся по электропроводности, что может обуславливать многократное переотражение и преломление ЭМИ. Вследствие этого созданный композит будет характеризоваться высокой эффективностью поглощения падающего излучения. Такие особенности взаимодействия ЭМИ с композитными материалами уже наблюдались в ряде работ [1,7,10,15].

Как отмечалось ранее, антиотражающий слой на поверхности композита формировался импульсной лазерной обработкой в режиме программно контролируемых кратных проходов лазерного луча по поверхности с заданной величиной шага между бороздками. Процесс обработки поверхности сопровождался созданием системы параллельных бороздок, а при последующем воздействии в перпендикулярном направлении формировались пирамидальные структуры (рис. 2 и 3).

Как отмечалось ранее, геометрические параметры канавок регулировались величиной энергии лазерной накачки, фокусным расстоянием и количеством проходов по одной канавке. В результате была изготовлена серия образцов, отличающихся топологическими параметрами в соответствии с характеристиками лазерного воздействия (рис. 3).

Лазерная обработка композиционного материала вызывает формирование неоднородных по форме ячеек на боковых поверхностях бороздок и пирамидок с размерами от 100 до 500 nm. Ячейки представляют собой

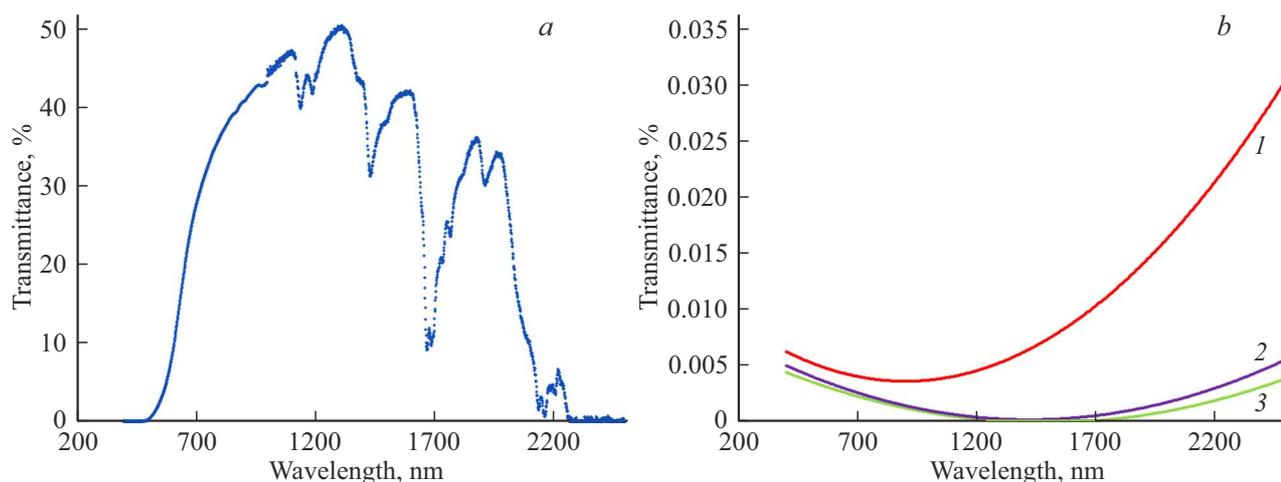


Рис. 5. Спектры пропускания исходного полимера (*a*) и образцов, содержащих МУНТ (*b*): 1 — без лазерной обработки, 2 — с обработкой поверхности для топологии параллельных бороздок, 3 — с обработкой для формирования пирамидок.

Толщина сформированных образцов

Образцы	Толщина образцов, mm
Эпоксидный полимер без МУНТ	2.5
Полимер с добавками нанотрубок	3.2
Режимы профилирования	
Линии 1 ($E_p = 12.5 \text{ J}$)	2.95
Линии 2 ($E_p = 13.0 \text{ J}$)	2.4
Решетка 1 ($E_p = 12.5 \text{ J}$)	2.3
Решетка 2 ($E_p = 13.0 \text{ J}$)	2.4

воздушные полости, окруженные областями проплавленного материала (рис. 4).

Такая особенность трехмерной структуры канавок или пирамидок обеспечивает согласование коэффициентов преломления ЭМИ обработанного лазером композита и воздуха, а также увеличение эффективности поглощения за счет многократного переотражения ЭМИ на стенках сформированных структур.

В таблице приведена одна из геометрических характеристик образцов — их толщина. Измерение её необходимо для определения эффективности поглощения ЭМИ сформированными слоями.

Следует отметить, что лазерная обработка в выбранных режимах исходного полимера, т.е. без добавления углеродных нанотрубок, не приводит к образованию канавок на поверхности образца. Поэтому влияние на отражательную способность, при формировании рельефа на поверхности образца без добавления углеродных нанотрубок, не удалось заметить.

Результаты измерения спектров пропускания эпоксидного полимера без МУНТ (рис. 5, *a*) свидетельствуют о низкой поглощающей способности его в спектральном диапазоне $0.5\text{--}2.2 \mu\text{m}$ (пропускает до 50% излучения). В то же время коэффициент пропускания для образцов с УНТ без лазерного структурирования поверхности

не превышает 0.04% (рис. 5, *b*), а для образцов с профилированной поверхностью и вовсе не более 0.01%. Данная величина является пределом чувствительности спектрометра, поэтому реальные значения могут быть ещё меньшими. Это свидетельствует о роли УНТ в процессах поглощения ЭМИ в спектральном диапазоне $0.2\text{--}2.5 \mu\text{m}$.

На рис. 6, *a* представлены результаты измерений коэффициента зеркального отражения в спектральном диапазоне $0.2\text{--}25 \mu\text{m}$ от композитных образцов с добавлением 4 wt.% углеродных нанотрубок со структурированной поверхностью методом импульсного лазерного облучения с шагом структурирования $h = 400 \mu\text{m}$. В более развернутом масштабе на рис. 6, *b* и 6, *c* приведены результаты измерений коэффициента отражения в диапазоне $0.2\text{--}2.5 \mu\text{m}$ при двух режимах энергии накачки лазера (12.5 J и 13 J) и двух расстояниях между канавками (400 и $100 \mu\text{m}$ соответственно). Для сравнения приведены также спектры отражения исходного полимера (образец N1) и композиционного материала, наполненного МУНТ (образец N2) без структурирования поверхности.

Добавление МУНТ в полимер приводит к значительному уменьшению коэффициента отражения во всем рассматриваемом спектральном диапазоне (рис. 6, *a*) и особенно заметно для интервала $0.2\text{--}2.5 \mu\text{m}$ (рис. 6, *b, c*). На длине волны $10 \mu\text{m}$ это уменьшение достигает коэффициента ~ 4 (рис. 6, *a*). В спектральном диапазоне $0.2\text{--}2.5 \mu\text{m}$ добавление УНТ в полимер вызывает уменьшение коэффициента отражения от ~ 2 до ~ 3 раз (рис. 6, *b*). Структурирование поверхности композита позволяет дополнительно снизить коэффициент отражения излучения (в ~ 3 раза) до десятых долей процента в зависимости от параметров лазерного облучения по сравнению со случаем композита без профилирования поверхности в спектральном диапазоне $0.2\text{--}3 \mu\text{m}$ (рис. 6, *a*). Минимальное отражение ЭМИ

во всем диапазоне $0.2\text{--}2.5\ \mu\text{m}$ наблюдается на образце № 4 с профилированием пирамидками при $E_p = 12\ \text{J}$. В диапазоне среднего ИК излучения ($3\text{--}25\ \mu\text{m}$) также наблюдается значительный эффект структурирования приповерхностной области (рис. 6, *a*). Здесь уменьшение коэффициента отражения составляет 1–2 порядка величины. При этом отражение в спектральном диапазоне $0.2\text{--}2.5\ \mu\text{m}$ для образцов со структурированной поверхностью, не превышающей 0.5%, и только для образца N3 коэффициент отражения в диапазоне $15\text{--}25\ \mu\text{m}$ находится на уровне 1%.

Применение лазерного структурирования поверхности композита в виде пирамидок в отношении уменьшения коэффициента отражения имеет определенные преимущества (рис. 6, *c*). Подобное влияние типа структурных элементов обнаружено и для образцов N5 и N6, для которых отраженный сигнал (0.03%) в видимом диапазоне для пирамидальной сетки на 0.04% слабее, чем для структур с канавками.

Следует отметить также важную роль величины шага между бороздками. Уменьшение шага структурирования от 400 до $100\ \mu\text{m}$ (рис. 6, *c*) приводит к значительному уменьшению интенсивности отраженного сигнала и одновременно изменяются паритеты коэффициентов отражения для различных режимов лазерной обработки.

Формирование специальной топологии поверхности позволяет уменьшить отражение на 1–2 порядка величины в зависимости от режимов лазерной обработки (рис. 6, *c*). Так, для образца 3 величина коэффициента отражения не превышает 0.1% в видимом ($0.4\text{--}0.8\ \mu\text{m}$) диапазоне и изменяется от 0.04% до 0.07% в ближнем ИК ($1\text{--}2.5\ \mu\text{m}$) (рис. 6, *c*). Для образца 5 коэффициент отражения в видимом диапазоне не превышает 0.07%, а в ИК области отраженный сигнал не регистрируется корректно вообще из-за недостаточной чувствительности спектрометра.

С точки зрения фундаментальной оптики „разреженность“ приповерхностной области твердого тела обеспечивает подавление отражения ЭМИ. В соответствии с законом Френеля падающий из воздушной среды (коэффициент преломления $n_o = 1.0003$) свет нормально к поверхности твердого тела с коэффициентом преломления n отражается от нее с коэффициентом отражения R :

$$R = (n - n_o)^2 / (n + n_o)^2. \quad (1)$$

Следовательно, отражение значительно подавляется, когда коэффициент преломления объекта близок к величине его для воздуха. Тем не менее для большинства твердых тел величина $n > 1.4$ (например, для материалов с низким значением показателя преломления, в частности для MgF_2 1.38, для фторсодержащих полимеров 1.3–1.4 [14]). Следовательно, интенсивность отраженного сигнала будет > 0.028 в соответствии с формулой (1). Снижением плотности

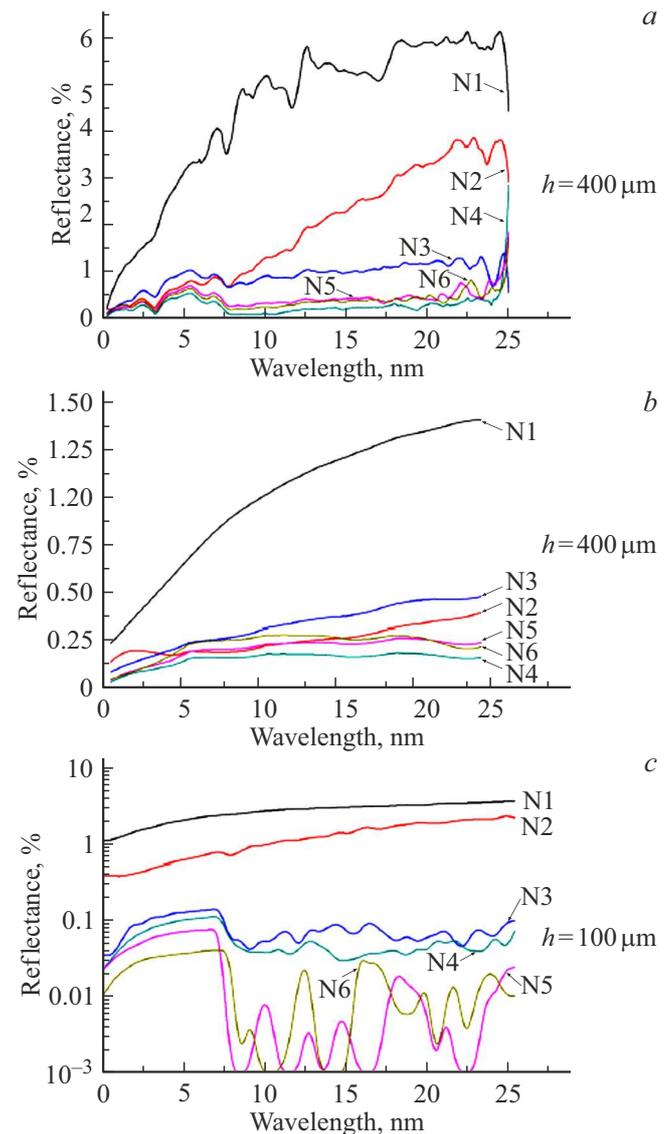


Рис. 6. Коэффициент зеркального отражения исходного полимера и композита до и после лазерной обработки поверхности в спектральном диапазоне $0.2\text{--}25\ \mu\text{m}$. (*a*) N1 — исходный полимер; N2 — композит без структурирования; N3 — композит со структурированием поверхности в виде канавок ($E_p = 12.5\ \text{J}$, $h = 400\ \mu\text{m}$); N4 — композит со структурированием поверхности в виде пирамидок ($E_p = 12.5\ \text{J}$, $h = 400\ \mu\text{m}$); N5 — композит со структурированием поверхности в виде канавок ($E_p = 13\ \text{J}$, $h = 400\ \mu\text{m}$); N6 — композит со структурированием поверхности в виде пирамидок ($E_p = 13\ \text{J}$, $h = 400\ \mu\text{m}$); (*b*) спектры для тех же параметров лазерного воздействия в расширенном масштабе спектрального диапазона $0.2\text{--}2.5\ \mu\text{m}$; (*c*) спектры для тех же параметров лазерного воздействия на том же композите, но обработанном с шагом структурирования $100\ \mu\text{m}$.

(обеспечением разреженности) материала можно преодолеть этот предел за счет уменьшения электронной плотности и, следовательно, диэлектрической постоянной ϵ . Поскольку $\epsilon \sim n^2$, то уменьшение вели-

чины ε приводит к уменьшению коэффициента преломления и соответственно к подавлению отражения.

Заключение

Результаты исследований настоящей работы продемонстрировали высокую эффективность применения контролируемой лазерной обработки композиционного материала на основе полимера, наполненного МУНТ, при создании антиотражающих в широком спектральном диапазоне (0.2–25 μm) поверхностей. В первую очередь — это формирование определенной топологии приповерхностной области образцов, обладающей коэффициентом преломления, близким к единице, и обеспечивающей многократное переотражение и поглощение ЭМИ. Вместе с этим формирование микроскопических неоднородностей и полостей на боковых стенках канавок и пирамид, а также благодаря собственным поглощающим свойствам МУНТ „Таунит-М“ удается заметно повысить эффективность использования таких структурированных материалов. Разработанные структурированные композитные материалы могут быть использованы для формирования антиотражающих покрытий как для оптических и оптоэлектронных систем авиакосмических аппаратов, так и аналогичных систем наземного базирования.

Благодарности

Авторы выражают благодарность И.Н. Пархоменко за обсуждение результатов работы и полезные рекомендации.

Финансирование работы

Работа выполнена в рамках Государственной программы научных исследований „Цифровые и космические технологии, безопасность общества и государства“ (проект № 5.1.4.3).

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Список литературы

- [1] J. Zhu, X. Yang, Z. Fu, C. Wang, W. Wu, L. Zhanbg. *J. Porous Mater.*, **23**(5), 1217 (2016). DOI: 10.1007/s10934-016-0180-5
- [2] Y. Lin, J. He. *Prog. Mater. Sci.*, **61**, 94 (2014). DOI: 10.1016/j.pmatsci.2013.12.003
- [3] M. Steglich, D. Lehr, S. Ratzsch, T. Kasebier, F. Schrepel, E. Kley, A. Tunnermann. *Laser Photonics Rev.*, **8**(2), L13 (2014). DOI: 10.1002/lpor.201300142
- [4] Y. Sun, J. Evans, F. Ding, N. Liu, Y. Zhang, S. He. *Opt. Express*, **23**(15), 20115 (2015). DOI: 10.1364/OE.23.020115
- [5] M. Otto, M. Algasinger, H. Branz, B. Gesemann, T. Gimpel, K. Fuchsel, T. Kasebier, S. Kontermann, S. Koynov, X. Li, V. Naumann, J. Oh, A. Sprafke, J. Ziegler, M. Zik, R. Wehrspohn. *Adv. Optical. Mater.*, **3**(2), 147 (2015). DOI: 10.1002/adom.201400395
- [6] F. De Nicola, P. Hines, M. Crescenzi, N. Motta. *Phys. Rev. B*, **96**, 045409 (2017). DOI: 10.1103/PhysRevB.96.045409
- [7] K. Amemiya, D. Fukuda, T. Numata, M. Tanabe, Y. Ichino. *Appl. Opt.*, **51**(29), 6917 (2012). DOI: 10.1364/AO.51.006917
- [8] S. Azoubel, R. Cohen, Sh. Mugdassi. *Surface and Coatings Technology*, **262**, 21 (2015). DOI: 10.1016/j.surfcoat.2014.11.063
- [9] D. Das, A. Banerjee. *Appl. Surf. Sci.*, **345**, 204 (2015). DOI: 10.1016/j.apsusc.2015.03.124
- [10] C.J. Chunnillall, J.H. Lehman, E. Theocharous, A. Sanders. *Carbon*, **50**, 5340 (2012). DOI: 10.1016/j.carbon.2012.07.014
- [11] J.Y. Liu, M. Soltani, R.K. Dey, B. Cui, R. Lee, H. Podmore. *J. Vac. Sci. Technol.*, **36**(6), 06JG01 (2018). DOI: 10.1116/1.5050986
- [12] S. Chuang, H. Chen, J. Shieh, C. Lin, C. Cheng, H. Liu, C. Yu. *Nanoscale*, **2**, 799 (2010). DOI: 10.1039/C0NR00010H
- [13] T. Uchida, M. Moro, S. Hiwasa, J. Taniguchi. In: *2015 International Conference on Electronics Packaging and iMAPS All Asia Conference (ICEP-IAAC)* (Kyoto, 2015), p. 422. DOI: 10.1109/ICEP-IAAC.2015.7111049
- [14] K. Amemiya, H. Koshikawa, T. Yamaki, Y. Maekawa, H. Shitomi, T. Numata, K. Kinoshita, M. Tanabe, D. Fukuda. *Nucl. Instr. Meth. Phys. Res. B*, **356**, 154 (2015). DOI: 10.1016/j.nimb.2015.05.002
- [15] I.N. Parkhomenko, L.A. Vlasukova, I.D. Parfimovich, F.F. Komarov, L.S. Novikov, V.N. Chernik, D.V. Zhigulin. *Acta Astronautica*, **204**, 124 (2023). DOI: 10.1016/j.actaastro.2022.12.046
- [16] W. Sun, A. Du, Y. Feng, J. Shen, S. Huang, J. Tang, B. Zhou. *ACS Nano*, **10**, 9123 (2016). DOI: 10.1021/acsnano.6b02039
- [17] K. Mizuno, J. Ishii, H. Kishida, Y. Hayamizu, S. Yasuda, N. Futaba, M. Yumura, K. Hata. *PNAS*, **106**(15), 6044 (2009). DOI: 10.1073/pnas.090015510
- [18] Z-P. Yang, L. Ci, J.A. Bur, S-Y. Lin, P.M. Ajayan. *Nano Lett.*, **8**(2), 446 (2008). DOI: 10.1021/nl072369t
- [19] P.B. Clapham, M.C. Hutrley. *Nature*, **244**, 281 (1973). DOI: 10.1038/244281a0
- [20] A.R. Parker, H.E. Townley. *Nat. Nanotechol.*, **2**, 347 (2007). DOI: 10.1038/nnano.2007.152
- [21] O. Zhao, T. Fan, J. Ding, D. Zhang, Q. Guo, M. Kamada. *Carbon*, **49**, 877 (2011). DOI: 10.1016/j.carbon.2010.10.048
- [22] S. J. Wilson, M. C. Hutley. *Optica Acta: International J. Optics*, **29** (7), 993 (1982). DOI: 10.1080/713820946
- [23] S. Ji, J. Park, H. Lim. *Nanoscale*, **4**, 4603 (2012). DOI: 10.1039/C2NR30787A
- [24] J. Lehman, C. Yung, N. Tomlin, D. Conklin, M. Stephens. *Appl. Phys. Rev.*, **5**, 011103 (2018). DOI: 10.1063/1.5009190
- [25] Углеродный наноматериал „Таунит“. [Электронный ресурс]. URL: <http://www.rusnanonet.ru/goods/20235/>