

УДК 539.23+539.32+535.34

СВОЙСТВА ФТОРУГЛЕРОДНЫХ НАНОПОКРЫТИЙ НА ЛЕЙКОСАПФИРЕ, СИНТЕЗИРОВАННЫХ С ПОМОЩЬЮ МОЩНОГО K_rF-ЛАЗЕРА

© 2022 г. П. Б. Сергеев^{1,*}, К. С. Кравчук², Н. В. Морозов¹

¹ Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН, Москва, Россия

² Технологический институт сверхтвердых и новых углеродных материалов, Москва, Троицк, Россия

*E-mail: sergeevpb@lebedev.ru

Поступила в редакцию 25.12.2021 г.

После доработки 25.12.2021 г.

Принята к публикации 07.01.2022 г.

Показана возможность синтеза фторуглеродных (С:F) покрытий с толщинами до 180 нм на поверхности лейкосапфира по технологии отжига слоя фторуглеродного масла излучением мощного K_rF-лазера. Измерено поглощение синтезированных С:F-нанопокровтий в диапазоне длин волн от 0.19 до 6 мкм. Оно было похоже на поглощение фторографена с максимумом в области 0.25 мкм. Нанотвердость фторуглеродных покрытий на лейкосапфире оказалась на уровне 7 ГПа, а модуль упругости ~250 ГПа, что близко к показателям фторографена. Представленные результаты впервые доказывают, что в реализованных условиях лазерного синтеза С:F-нанопокровтий можно создавать фторуглеродные материалы с предельно высокими механическими свойствами, близкими к фторографеновым.

DOI: 10.56304/S1992722322040203

ВВЕДЕНИЕ

В данной работе представлены новые результаты поиска возможностей использования мощных электронно-пучковых эксимерных лазеров для решения технологических задач. Уникальные лазеры этого типа могут генерировать излучение в УФ-диапазоне спектра с энергией от 10 Дж до 10 кДж импульсами длительностью ~100 нс [1]. Но проработка перспектив их технологического применения очень слабая [2]. Отсюда и актуальность поиска возможных вариантов их использования, в частности для модификации поверхностей различных материалов. Эти исследования сейчас являются приоритетными на установке ЭЛА [2, 3].

Лазерная установка ЭЛА расположена на Троицкой площадке Физического института им. П.Н. Лебедева РАН. Она предназначена для изучения физики электронно-пучковых эксимерных лазеров и воздействия их излучения на разные материалы. На ней можно генерировать лазерные излучения (ЛИ) с длинами волн $\lambda = 193, 248, 353$ нм и другими с энергиями ~10 Дж при длительностях импульсов ~80 нс [1]. В проведенных экспериментах использовали излучение K_rF-лазера с $\lambda = 248$ нм.

В [3] было обнаружено, что отжиг тонкого слоя фторуглеродного масла на поверхности

титановых пластинок излучением K_rF-лазера установки ЭЛА приводит к появлению на них С:F-нанопленок. Модуль Юнга у этих нанопленок ~130 ГПа. Это лишь втрое меньше, чем у фторографена с его предельно высокими среди фторуглеродных материалов упругими свойствами (300 ГПа) [4]. Столь высокие механические свойства полученных по новой лазерной технологии С:F-нанопленок на титане нуждаются в подтверждении возможностей их синтеза и на других материалах.

Цель настоящей работы заключалась в проверке применимости лазерной технологии [3] для создания фторуглеродных нанопокровтий на поверхности лейкосапфира. Выбор этого материала был обусловлен рядом факторов. В первую очередь его существенное отличие по физико-химическим свойствам от титана, что должно было прояснить влияние материала подложки на механические свойства нанопокровтий. Далее прозрачность Al₂O₃ позволяла определять оптические свойства синтезируемых нанопокровтий, что важно для раскрытия их структуры. И, наконец, планировалась проверка выводов [2] о стойкости подложек из лейкосапфира к ударным нагрузкам от лазерной плазмы.

МЕТОДЫ ПОЛУЧЕНИЯ И ИЗУЧЕНИЯ C:F-НАНОПОКРЫТИЙ

Техника синтеза C:F-нанопокровтий. В данных экспериментах, как и в [2, 3], излучение Krf-лазера получали на установке ЭЛА. Резонатор лазера состоял из заднего вогнутого зеркала с радиусом 20 м и отражением около 100%, а также выходного плоского зеркала с отражением 25%. Этот оптимальный по прозрачности резонатор лазера позволял получать энергию генерации до 14 Дж при давлении рабочей газовой смеси из аргона, криптона и фтора ~3 атм [1]. Для получения однородного распределения плотности ЛИ по выходному окну лазера диаметром 5 см в данных экспериментах выбирали давление газовой смеси от 1.5 до 2 атм. Энергия ЛИ при этом достигала 10 Дж при почти прямоугольных импульсах с длительностью ~80 нс. Расходимость ЛИ составляла 10^{-2} рад.

Излучение Krf-лазера, как и в [2, 3], фокусировалось плоско-выпуклой линзой с фокусным расстоянием 40 см. Лазерное излучение, отраженное от грани линзы, заводилось на калориметр, с помощью которого контролировали энергию каждого импульса. Облучаемые образцы размещали за фокусом линзы в плоскости изображения выходного окна лазера. Это обеспечивало максимальную однородность распределения плотности энергии ЛИ (F) по всему облучаемому пятну диаметром 9 мм. Максимальные значения F в таком пятне в данных экспериментах достигали 10 Дж/см², а интенсивности — 120 МВт/см².

Использованные в работе квадратные пластины Al₂O₃ с гранью в 15 и толщиной 3 мм были нарезаны из одного кристалла. Рабочие грани пластины после полировки имели шероховатость с $R_a \approx 6$ нм и четвертый класса чистоты. Прямоугольная геометрия лейкосапфировых подложек была выбрана с учетом выводов [2] об их максимальной стойкости к ударным нагрузкам от создаваемой на поверхности лазерной плазмы.

На квадратной подложке с гранью 15 мм можно было поместить с небольшим перекрытием до четырех лазерных пятен диаметром в 9 мм. Но делалось не более трех. Одна четвертушка у каждой пластинки оставлялась чистой для прописывания на спектрофотометрах ее исходного, нулевого пропускания T_0 . Оно необходимо для определения спектров пропускания осажденных на эту подложку покрытий.

В качестве покровного материала, как и в [3], использовали фторуглеродное масло (ФМ). Его тонкие слои толщиной от 10 до ~1 мкм наносили на подложки Al₂O₃ простой ватной палочкой.

Выполненные эксперименты и полученные результаты по лазерному отжигу слоев ФМ на

лейкосапфире подразделяются на три группы. К первой относятся результаты по отжигу масляных слоев на передней грани подложек в разных режимах по количеству импульсов и плотностям энергии ЛИ. Ко второй группе отнесены результаты, полученные при отжиге слоев ФМ, в которое был добавлен порошок TiC с размером частиц ~1 мкм. В массовом отношении содержание порошка в ФМ было на уровне 1/10. Так проверялось возможное влияние примеси титана на свойства синтезируемых C:F-нанопокровтий.

К третьей группе отнесены результаты, полученные по следующей схеме проведения эксперимента. Здесь на *выходную* грань лейкосапфировой подложки наносили слой чистого ФМ, а на него накладывали титановую фольгу толщиной 14 мкм. Фольгу прижимали к подложке скотчем. В этой схеме излучение Krf-лазера подводилось к слою ФМ и поверхности титана через лейкосапфировую подложку. Толщина облучаемого лазерным излучением слоя ФМ здесь определялась шероховатостью титановой фольги и была ~2 мкм. В данном случае осаждение C:F-покрытия из лазерной плазмы проводилось одновременно и на титан, как в [3], и на подложку Al₂O₃. Полученные результаты отметим цифрами 1, 2 и 3, обозначающими описанные выше три группы условий их получения.

Техника изучения C:F-нанопокровтий. Все пятна, оставшиеся на лейкосапфировых подложках после лазерного отжига ФМ в разных режимах, изучали на спектрофотометрах. Благо, что размер этих пятен с диаметром 9 мм легко позволял это делать. Использовали три спектрофотометра: Hitachi U-3900 со спектральным диапазоном от 0.19 до 1.1 мкм, Cary 5000 — от 0.8 до 3.3 мкм, фурье-спектрометр ФСМ 2201 — от 1.3 до 6 мкм. На всех приборах спектры пропускания $T(\lambda)$ регистрировали в цифровом формате с постоянным шагом по длине волны λ не более 1 нм. Перекрытие краев спектров, получавшихся с одного и того же пятна на разных спектрофотометрах, использовали для “сшивки”, объединения этих участков в один общий. Точность определения значений $T(\lambda)$ в одном спектре в области $0.2 < \lambda < 4$ мкм не превышала 1.5%.

По спектрам пропускания лейкосапфировых образцов с покрытиями, полученными в соответствующих трех условиях облучения, были отображены три (по одному из каждой группы), чьи спектры максимально отличались от $T_0(\lambda)$. Это указывало на присутствие на них максимально толстых покрытий. Эти три образца затем изучали на нанотвердометре, на оптическом профилометре, на спектрофотометре комбинационного рассеяния.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

Спектры поглощения С:F-нанопокровтий. Пленка 1 на лейкосапфире получена после отжига в одном и том же месте слоев ФМ излучением КгF-лазера двумя импульсами с $F = 6.8 + 6.3$ Дж/см². При этом перед первым импульсом слой ФМ имел толщину ~10 мкм, а перед вторым ~1 мкм. Пленка 2 получена четырьмя импульсами ЛИ с $F = 8.1 + 7.8 + 8 + 7.3$ Дж/см². При этом толщины слоев (ФМ + TiC) в каждой последующей паре импульсов чередовались как 10 и 1 мкм. Пленка 3 получена после однократного облучения с $F = 8.3$ Дж/см².

Измеренные на спектрофотометрах спектры $T_i(\lambda)$ от соответствующих образцов 1, 2 и 3, а также типичный спектр пропускания чистой пластины $\text{Al}_2\text{O}_3 - T_0(\lambda)$ показаны на рис. 1а. Из него видно, что спектральная область прозрачности образцов лейкосапфира от $\lambda = 0.19$ до 6 мкм задает область определения поглощения синтезированных покрытий.

Цифровой формат исходных спектральных данных позволяет получить *расчетное* значение пропускания соответствующих покрытий T_i^* путем стандартного пошагового преобразования: $T_i^* = T_i(\lambda)/T_0(\lambda)$. Здесь $i = 1-3$ – номера соответствующих пятен. Рассчитанные таким образом спектры T_i^* показаны на рис. 1б. Видно, что у образцов 1 и 2 отличие пропускания от уровня в 100% заметно лишь в области $\lambda < 1$ мкм, а у образца 3 оно наблюдается по всему спектральному диапазону.

Изучение рельефа поверхности образцов 1–3 на конфокальном оптическом профилометре показало, что шероховатость в пятнах 1 и 2 практически не отличалась от исходной с $R_a \approx 6$ нм. В третьем пятне она повысилась до 50 нм. Здесь на поверхности появились волнообразные структуры шириной ~5 мкм и высотой до 0.4 мкм, а вблизи границы лазерного пятна – острые пики с амплитудой до 1 мкм. Все это явные следы плавления поверхности лейкосапфира, как и в случае с титаном [3].

Такой рельеф поверхности приводит к повышенному рассеянию излучения по всему спектральному диапазону. Работа [5] дает представление о форме спектра такого рассеяния. Плавление и быстрое остывание расплава могут приводить к повышению поглощения на собственных дефектах [6, 7] и появлению примесного поглощения. Все это накладывается на поглощение С:F-покрытия. Выделить вклады отдельных компонентов в общий спектр пока невозможно, но о них надо помнить при сравнении спектров от представленных трех образцов.

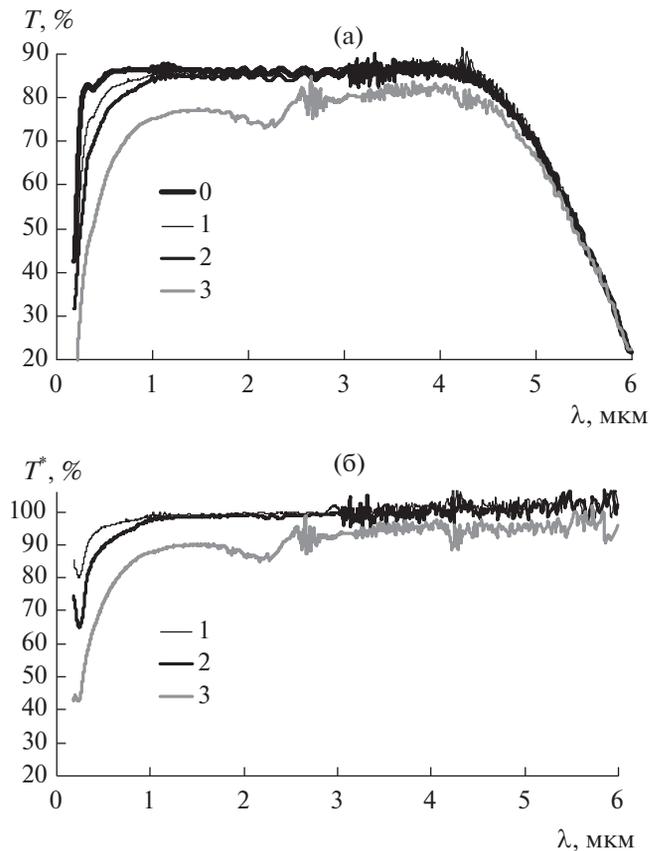


Рис. 1. Спектры пропускания чистого образца лейкосапфира (0) и образцов 1, 2 и 3 с С:F-нанопокровтиями (а). Рассчитанные спектры пропускания нанопокровтий 1, 2 и 3 (б).

Цифровой формат спектральных данных позволяет сделать еще одно стандартное преобразование и получить спектр оптической плотности (**OD**) для каждого из покрытий: $\text{OD}_i = \ln(T_i^*) \approx \alpha_i \cdot t_i$. Здесь α_i – коэффициент поглощения покрытий, а t_i – их толщина. Полученные таким образом спектры $\alpha_i \cdot t_i$ представлены на рис. 2. По оценкам точность расчета значений $\alpha_i \cdot t_i$ не превышает 0.03. В пределах этой ошибки у покрытий 1 и 2 в области λ от ~1.5 до 6 мкм $\alpha_i t_i \approx 0$. Особенности третьего спектра в этой области относим к вкладам от оплавленной подложки.

Единой особенностью всех спектров на рис. 2 является наличие сильной полосы поглощения с максимумом в области 250 нм (5 эВ). Для сравнения формы этих полос удобно сделать их преобразование путем нормировки на соответствующий максимум: $\alpha_i t_i / \max(\alpha_i t_i) = \alpha_i / \max(\alpha_i)$. Для удобства сопоставления с известными данными зависимости $\alpha_i / \max(\alpha_i)$ на рис. 3 построены не от длины волны, а от энергии зондирующих квантов (E). Как видим, максимумы у всех этих спектров

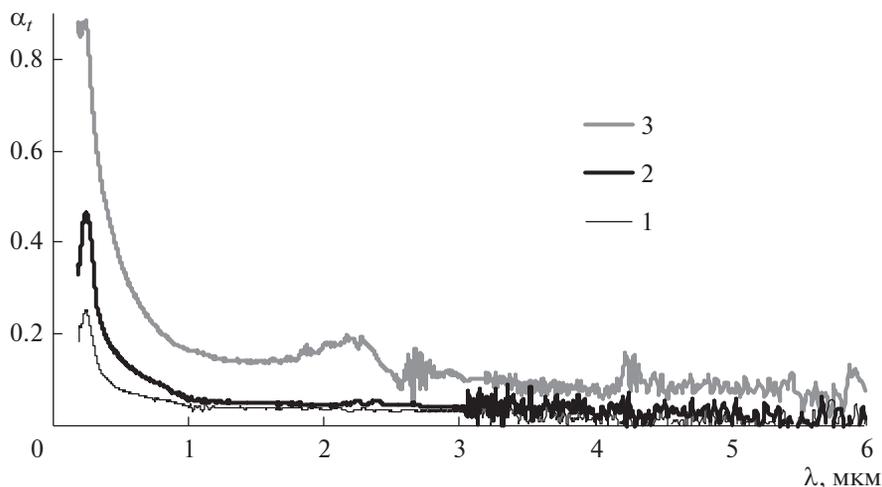


Рис. 2. Спектры оптической плотности С:F-нанопокровтий 1, 2 и 3.

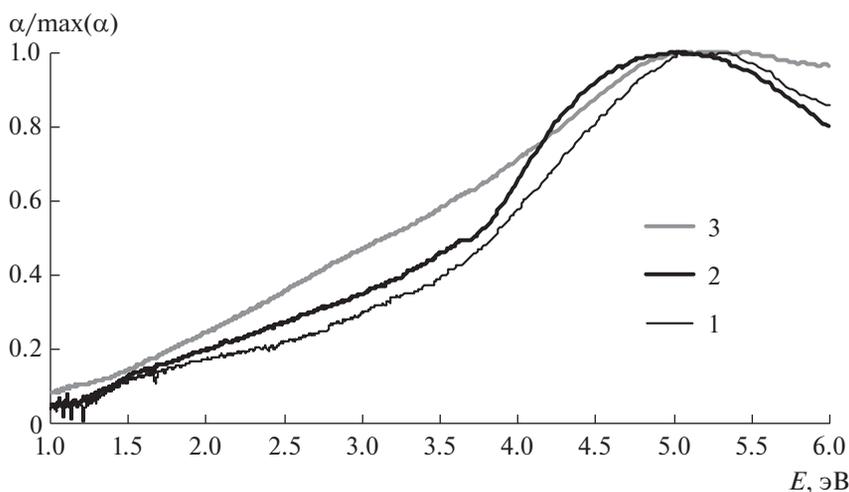


Рис. 3. Нормированные на максимум в области 5 эВ спектры поглощения С:F-нанопокровтий 1, 2 и 3.

практически совпадают, находясь в области $E = 5.1 \pm 0.05$ эВ. На шкале λ это диапазон 245 ± 2 нм.

Полоса поглощения образцов 1 и 2 в УФ-диапазоне схожа с поглощением фторографена [4]. В [8] было показано, что эта полоса обусловлена экситонным поглощением, имеющимся и в однослойных, и многослойных фторографеновых пленках. Полученные результаты указывают на ее присутствие и в менее упорядоченных С:F-наноструктурах. По-видимому, структурные различия у всех этих нанопленок отражаются лишь на форме крыльев базовой экситонной полосы поглощения.

Визуальное сравнение вида С:F-нанопленок на лейкосапфире и титане позволило прояснить еще один факт. Наблюдавшееся в [3] потемнение пятна на титане в месте отжига ФМ с ростом чис-

ла лазерных импульсов обусловлено почернением именно титановой поверхности, а не цветом образовавшейся на ней нанопленки. На лейкосапфире все эти нанопленки визуально почти не заметны.

Все три пятна на лейкосапфировых подложках были исследованы на спектрофотометре “Renishaw inVia Raman Microscope”, Великобритания. Возбуждающий лазер с длиной волны $\lambda = 532$ нм. Выявлено, что у фторуглеродных нанопленок на лейкосапфире кроме люминесцентного фона никаких характерных сигналов не наблюдается. Следовательно, все линии в спектрах комбинационного рассеяния света, зарегистрированные в [3], принадлежат материалам с модифицированной поверхности титана, а не прикрывающим ее С:F-нанопленкам.

В [9] представлены спектры пропускания двух фторографеновых нанопленок разной толщины. По ним был проведен расчет коэффициента поглощения этих пленок на длине волны $\lambda = 0.4$ мкм и получено значение $2.5 \times 10^4 \text{ см}^{-1}$. Эта величина, а также данные по $\alpha_i t_i$ (рис. 2) на той же длине волны 0.4 мкм позволяют рассчитать толщину покрытий 1, 2 и 3, которые оказались равными 40, 80 и 180 нм соответственно.

Напомним, что на титане при отжиге ФМ четырьмя импульсами ЛИ, как и в случае образца 2, измеренная толщина С:Ф-нанопленки была 60 нм [3]. На третьем пятне с помощью профилометра на чистой поверхности подложки Al_2O_3 возле зоны плавления удалось найти участки с С:Ф-покрытием и измерить их толщину, которая составила 160 нм. Она близка к расчетному значению в 180 нм. Эти данные свидетельствуют о корректности сделанной оценки толщин С:Ф-нанопокровтий.

Знание толщины покрытий и спектры αt (рис. 2) дают возможность определения среднего значения максимального коэффициента поглощения на 245 нм у синтезированных С:Ф-покрытий: $\alpha(245 \text{ нм}) = (6 \pm 2) \times 10^4 \text{ см}^{-1}$. Эта величина наряду со спектрами на рис. 2 и 3 теперь дают инструментарий для определения толщин синтезируемых фторуглеродных нанопленок при знании спектров их поглощения.

Механические свойства С:Ф-нанопокровтий. Изучение механических свойств С:Ф-нанопокровтий на лейкосапфире проводили в ФГБНУ “Технологический институт сверхтвёрдых и новых углеродных материалов” на нанотвердомере

“НаноСкан-4D”. Наноиндентирование поверхности образцов проводили по стандартной методике, детали которой подробно изложены во многих публикациях, в частности в [10–12]. Результатом такого изучения образцов стали зависимости их нанотвердости (H) от глубины погружения индентора (h) и такие же зависимости модуля продольной упругости (E). Последний с точностью до 6% совпадает с модулем Юнга исследуемого материала [13].

На рис. 4 представлены результаты измерений $H(h)$ трех пятен с С:Ф-покрытиями на лейкосапфире и его чистой поверхности. Как видно, величины H покрытий образцов 1 и 3 почти совпадают и равны 7 ± 2.5 ГПа. Это примерно в 1.5 раза выше, чем у аналогичных покрытий титана, где H составляло 5 ГПа [3].

У образца 2, где отжигали слои ФМ с подмешанным порошком TiC, величина H оказалась почти в 2 раза больше, чем у образцов 1 и 3. Для выводов о возможном влиянии примеси TiC в ФМ на такое повышение H необходимы дополнительные эксперименты. Высокие значения H у С:Ф-нанопокровтий как на титане, так и на лейкосапфире указывают на то, что данный показатель есть свойство материала покрытий.

На рис. 5 приведены результаты измерений на нанотвердомере зависимостей модуля нормальной упругости $E(h)$ для чистой поверхности лейкосапфира и образцов 1, 2 и 3. Видно, что модуль упругости всех С:Ф-нанопокровтий на Al_2O_3 в области $h < 100$ нм составляет 250 ± 70 ГПа. На титане он был ~ 130 ГПа [3]. С учетом упругости подложек измеренные результаты E С:Ф-нанопокров-

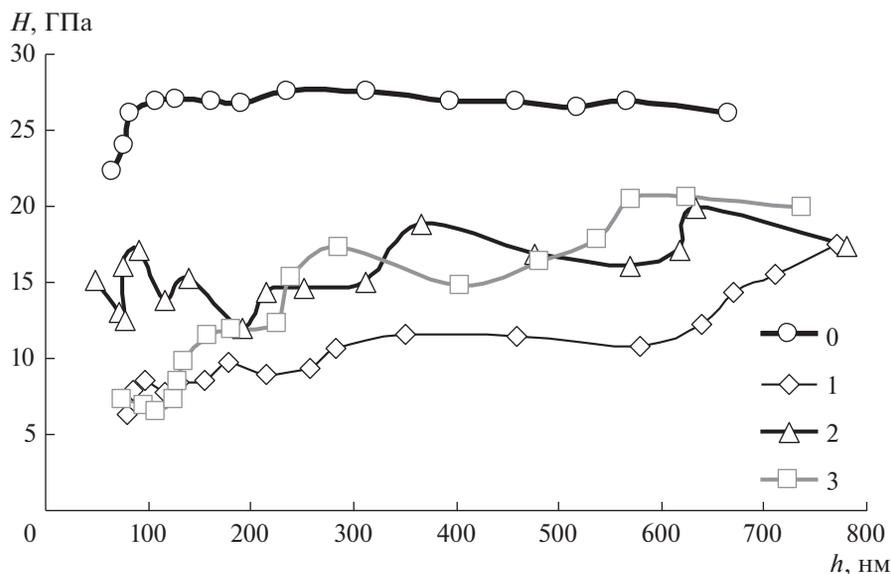


Рис. 4. Зависимости нанотвердости H от глубины погружения индентора h для чистой поверхности лейкосапфира (0) и образцов 1, 2 и 3.

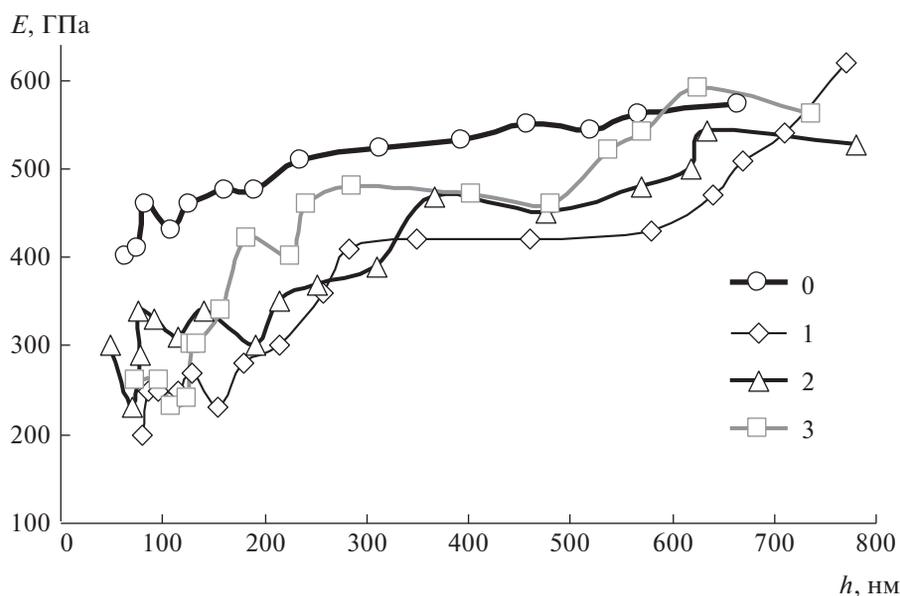


Рис. 5. Зависимости модуля нормальной упругости E от глубины погружения индентора h для чистой поверхности лейкосапфира (0) и образцов 1, 2 и 3.

тий на титане могут быть несколько занижены, а на лейкосапфире — завышены. Средняя величина модуля упругости данных нанопокрывтий оказывается на уровне 200 ГПа, что лишь в 1.5 раза меньше, чем у фторографена. Этот показатель E , как и в случае H , есть характеристика нового синтезированного С:Ф-материала при его толщинах до ~ 180 нм.

В заключение отметим и прочностные свойства использованных лейкосапфировых образцов. При работе в третьем режиме, когда разлет лазерной плазмы ограничивался титановой фольгой, скачок давления у поверхности образцов мог доходить до 10^9 Па, что на порядок выше, чем в случае [2]. Но во всех реализованных режимах облучения лейкосапфировых образцов излучением КгF-лазера ни один из них не разрушился. Это доказывает правильность выводов [2] о стойкости прямоугольных лейкосапфировых образцов к ударным нагрузкам.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Представленные в данной работе результаты по лазерному синтезу С:Ф нанопокрывтий на лейкосапфире и определению ряда их свойств, а также сравнение этих данных с результатами [3] кратко можно сформулировать следующим образом.

Материал синтезированных фторуглеродных нанопокрывтий как на титане, так и на лейкосапфире при толщинах до ~ 180 нм имеет нанотвердость на уровне 5–7 ГПа и модуль упругости ~ 200 ГПа, что близко к упругости

фторографена. Назовем этот новый материал **ТРОФУМ**.

ТРОФУМ имеет спектр поглощения, схожий с поглощением фторографена. У ТРОФУМ коэффициент поглощения в максимуме экситонной полосы на 245 нм равен $(6 \pm 2) \times 10^4 \text{ см}^{-1}$, а в ИК-диапазоне вплоть до 6 мкм он не превышает 10^3 см^{-1} .

Синтез ТРОФУМ осуществляется из остывающей фторуглеродной лазерной плазмы с исходной температурой ~ 1 эВ и давлением $\sim 10^9$ Па.

В ТРОФУМ соотношение количества атомов углерода к количеству атомов фтора близко к 1/2.

Заметим, что у известных твердотельных С:Ф-материалов соотношение $C/F = 1/2$ имеет базовый фторопласт Ф4 с его линейными макромолекулами и механическими свойствами более чем в 300 раз меньшими, чем у ТРОФУМ. Какова же структура упаковки атомов в этом новом материале — вот ключевой вопрос, определяющий главное направление дальнейших исследований ТРОФУМ.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Представленные результаты доказывают, что по технологии отжига тонких слоев фторуглеродного масла излучением мощного КгF-лазера можно синтезировать С:Ф-нанопокрывтия с толщинами до 180 нм не только на титане, но и на лейкосапфире. Механические и оптические свойства этих покрывтий близки к фторографену, что открывает перед ними широчайшие перспек-

тивы использования в современных технологиях. Еще раз отметим, что процесс лазерного синтеза С:Ф-нанопокровтий проводится на воздухе. Это удобно в технологическом плане и позволяет проводить пошаговую обработку поверхностей деталей с неограниченной площадью.

Авторы выражают благодарность В.И. Козловскому и Я.К. Скасырскому за помощь при спектральных измерениях, а также Т.Е. Дроздовой за исследование образцов на спектрофотометре комбинационного рассеяния.

Измерения механических характеристик С:Ф-нанопокровтий и спектры их комбинационного рассеяния выполнены с использованием оборудования ЦКП ФГБНУ ТИСНУМ “Исследования наноструктурных, углеродных и сверхтвердых материалов”.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Sergeev P.B.* // J. Soviet Laser Res. 1993. V. 14. № 4. P. 237.
<https://doi.org/10.1007/BF01120654>
2. *Сергеев П.Б., Морозов Н.В., Кириченко А.Н.* // Квантовая электроника. 2018. Т. 48. № 2. С. 136.
<https://doi.org/10.1070/QEL16557>
3. *Сергеев П.Б., Кириченко А.Н., Кравчук К.С. и др.* // Квантовая электроника. 2020. Т. 50. № 12. С. 1173.
<https://doi.org/10.1070/QEL17420>
4. *Nair R.R., Ren W.C., Jalil R. et al.* // Small. 2010. V. 6. P. 2877.
<https://doi.org/10.1002/smll.201001555>
5. *Юрина В.Ю., Нецименко В.В., Чундун Ли.* // Поверхность. Рентген., синхротр. и нейтр. исследования. 2020. № 3. С. 46.
<https://doi.org/10.31857/S1028096020030218>
6. *Вайнштейн И.А., Кортов В.С.* // ФТТ. 2000. Т. 42. № 7. С. 1223.
<https://doi.org/10.1134/1.1131373>
7. *Кортов В.С., Вайнштейн И.А., Вохминцев А.С., Гаврилов Н.В.* // Журн. прикл. спектроскопии. 2008. Т. 75. № 3. С. 422.
8. *Karlicky F., Otyepka M.* // Ann. Phys. 2014. V. 526 (9–10). P. 408.
<https://doi.org/10.1002/andp.201400095>
9. *Ivanov F.I., Nebogatikova N.A., Kotin I.A., Antonova I.V.* // Phys. Chem. Chem. Phys. 2017. V. 19. P. 19010.
<https://doi.org/10.1039/c7cp03609d>
10. *Gladkikh E.V., Kravchuk K.S., Useinov A.S. et al.* // Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii, Seriya Khimiya i Khimicheskaya Tekhnologiya. 2020. V. 63. № 12. P. 57.
<https://doi.org/10.6060/ivkkt.20206312.2y>
11. *Головин Ю.И.* // ФТТ. 2021. Т. 63. № 1. С. 3.
<https://doi.org/10.1134/S1063783421010108>
12. *Frolova M.G., Titov D.D., Lysenkov A.S. et al.* // Ceram. Int. 2020. V. 46. № 11. P. 18101.
<https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2020.04.130>
13. *Chudoba T., Jennett N.M.* // J. Phys. D. 2008. V. 41. № 21. P. 215407.
<https://doi.org/10.1088/0022-3727/41/21/215407>