Синтез фторуглеродных нанопленок на титане с помощью излучения мощного KrF-лазера

П.Б.Сергеев, А.Н.Кириченко, К.С.Кравчук, Н.В.Морозов, Р.А.Хмельницкий

Осуществлен синтез фторуглеродных (C : F) нанопленок толщиной до 60 нм на поверхности титановых образцов. Пленки были получены при отжиге на воздухе тонких слоев фторуглеродного масла (ФМ) на площади 0.6 см^2 излучением KrF-лазера при плотностях энергии более 4 Дж/см^2 в импульсах длительностью 80 нс. Прочность C : F-нанопокрытий оказалась сравнимой с прочностью титана и в сотни раз превышала показатели фторопласта Ф-4. Высокая прозрачность ФМ указывает на возможности его использования в качестве покровной жидкости при модификации поверхности титана излучением многих технологических лазеров.

Ключевые слова: *синтез нанопленок, C : F-нанопленки, титан, фторуглеродное масло, KrF-лазер, лазерное излучение.*

1. Введение

Фторопласты имеют известные уникальные физико-химические свойства, что и определяет их широчайшее применение, в том числе в качестве пленок и покрытий [1, 2]. Открытие графена (Gr), а затем и фторографена (FGr) [3] привлекло внимание и к ним, и к их многослойным разновидностям, толщины которых составляют сотни нанометров. Интенсивность исследований фторографенов характеризуется числом цитирований [3], которое на данный момент превышает 830 [4]. Но графен и фторографен – это структуры со строго определенной углеродной решеткой. Фторуглеродные (C : F) нанопленки и покрытия по углеродной структуре, а значит, и свойствам, отличаются от фторографена [5]. Характеристики нанопленок сильно зависят от того, как и из чего они получаются, а также от материала и структуры подложек, на которые их осаждают. По сути, при каждом новом способе создания нанопокрытий новые характеристики приобретают как исходные вещества, так и поверхности подложек. Могут сильно изменяться и прочностные характеристики C : F-нанопокрытий – от уровня базового фторопласта Ф-4 с модулем Юнга 4×10^8 Па [1, 6] до предельно высоких значений, как у FGr, – 3×10^{11} Па [3]. Все это и определяет актуальность поиска новых способов синтеза фторуглеродных нанопокрытий.

Уже к 2008 году существовал ряд работ, в которых сообщалось о синтезе на различных подложках фторопластовых нанопленок толщиной от 1.5 до ~100 нм, осуществлявшемся на основе метода осаждения полимера из его раствора в жидком или сверхкритическом CO_2 [6]. Отмечалось, что молекулярная структура фторполимера типа $(CF_2)_n$ в этих нанопленках сохранялась, но менялась их самоорганизация в надмолекулярных структурах. Последние сильно зависели от типа и качества подложек, а также от многих других параметров процесса осаждения. Физико-химические свойства этих нанопленок были сравнимы со свойствами обычных, более массивных структур фторопласта Ф-4.

Открытие уникальных свойств фторографена стимулировало изучение свойств C : F-нанопленок, синтезируемых с помощью разных методов химического и физического осаждения из газовой фазы (так называемые CVD технологии) [7–9]. Этому способствовало наличие технологического оборудования во многих лабораториях, занимавшихся изучением различных углеродных (C) и других пленок и покрытий [8–12]. При этом использовался и комбинированный вариант синтеза многослойного FGr, когда вначале с помощью плазмохимического метода синтезируется C-нанопленка толщиной до 10 нм, а затем она фторируется [13]. Механические свойства такого многослойного FGr должны быть лишь немногим хуже, чем у их углеродной основы, как в случае FGr и Gr. Широчайшие вариации прочностных свойств синтезированных C-нанопленок [14] указывают на возможность существования и очень прочных C:F-нанопленок. Однако вопрос о способах их создания, несмотря на его актуальность, остается открытым.

Среди CVD технологий выделяются методы синтеза нанопленок и покрытий с помощью лазеров [12, 15–21]. Для этих целей пригодны и уникальные эксимерные электронно-пучковые лазеры (ЭПЛ) с энергией импульсов излучения от 10 Дж и выше при их длительностях ~100 нс. Так, в [22] было показано, что при отжиге слоя трансформаторного масла на выходной поверхности подложек из стекла КУ-1 двумя импульсами KrF-ЭПЛ (λ = 248 нм) можно создавать углеводородную пленку толщиной до 40 нм. Процесс осуществлялся на воздухе по схеме подвода лазерного излучения (ЛИ) к границе стекло–жидкость через стекло. Схема проста, но имеет ограничение: материал подложек должен быть прозрачен для ЛИ. Есть также схема с подводом ЛИ к границе двух сред, например металл–жидкость, через жидкость, кото-

П.Б.Сергеев, Н.В.Морозов, Р.А.Хмельницкий. Физический институт им. П.Н.Лебедева РАН, Россия, 119991 Москва, Ленинский просп., 53; e-mail: sergeevpb@lebedev.ru
А.Н.Кириченко, К.С.Кравчук. Технологический институт сверхтвердых и новых углеродных материалов, Россия, 108840 Москва, Троицк, ул. Центральная, 7а

Поступила в редакцию 18 августа 2020 г., после доработки – 27 сентября 2020 г.

рая часто используется при абляции [23–28]. Здесь уже жидкость должна быть прозрачной для ЛИ. Для коротковолнового излучения эксимерных лазеров с интенсивностями до 100 МВт/см^2 ответить на вопрос о прозрачности жидкости на обрабатываемых поверхностях весьма сложно из-за образования лазерной плазмы. В связи с этим реализуемость такой схемы синтеза покрытий и модификации поверхности металлов с помощью эксимерных ЭПЛ доказывается лишь экспериментально.

Цель настоящей работы – экспериментальное выявление возможности создания фторуглеродных нанопленочных покрытий на титане с помощью излучения мощного KrF-ЭПЛ. Синтезировать C:F-нанопленку предполагалось за счет осаждения продуктов из фторуглеродной лазерной плазмы, создаваемой у поверхности металла. Результаты первой удачной реализации этой идеи представлены ниже. Титан был выбран в качестве основы в силу потенциальной перспективности нового покрытия именно для этого, широко используемого в современной технике и медицине материала.

2. Эксперименты

Как уже отмечалось, при лазерной модификации поверхности металлов под слоем жидкости необходимо, чтобы жидкий покровный материал был максимально прозрачен для ЛИ. В плане применимости технологии важна и простота нанесения покровного слоя. С учетом данных требований и опыта [22] в качестве покровного материала впервые использовалось фторуглеродное масло (ФМ). Это масло предназначено для использования в форвакуумных насосах. Оно представляет собой густую высокопрозрачную жидкость с плотностью 2.2 г/см^3 и оказалось очень удобным в работе. ФМ не токсично и не огнеопасно, как и прочие фторуглеродные жидкости.

Для более детальной характеризации ФМ были исследованы его спектральные характеристики. С использованием спектрофотометров Hitachi U 3900 (диапазон длин волн 0.19–0.8 мкм), Cary 5000 (0.2–3.3 мкм) и фурье-спектрометра ФСМ 2201 (1.28–12.5 мкм) были получены спектры пропускания $T(\lambda)$ образцов ФМ с толщинами 0.1 и 1 см в кварцевых кюветах. Измерялись также спектры пропускания пленок ФМ разной толщины на кварцевых и флюоритовых подложках, а также спектры самих подложек и кювет. Стандартная цифровая обработка всей совокупности этих спектров позволила построить спектр поглощения ФМ ($\alpha(\lambda)$) в области 0.2–11 мкм (рис.1).

Ультрафиолетовый край зависимости $\alpha(\lambda)$ позволяет оценить важную характеристику аморфных материалов: ширину оптической запрещенной зоны E_{04}. Она равна энергии зондирующих квантов света, при которой коэффициент поглощения материала, как правило, в виде тонких пленок, равен 10^4 см$^{-1}$ [14, 29]. Такое значение достигается для ФМ вблизи длины волны 190 нм, т.е. E_{04} = 6.4 эВ. Это значение характерно для хорошего диэлектрика.

Определенный экспериментально коэффициент поглощения ФМ на длине волны излучения KrF-лазера 248.4 нм равен 380 ± 10 см$^{-1}$. Отметим также, что в области спектра 0.35–3.2 мкм коэффициент поглощения для ФМ не превышает 1 см$^{-1}$, а в области 0.46–2.1 мкм он меньше 0.1 см$^{-1}$. На длине волны излучения CO_2-лазера (10.6 мкм) α = 680 см$^{-1}$, что примерно лишь вдвое больше, чем в случае излучения KrF-лазера. Плато в спектре $\alpha(\lambda)$ в области 7.5–9 мкм обусловлено выходом за пределы

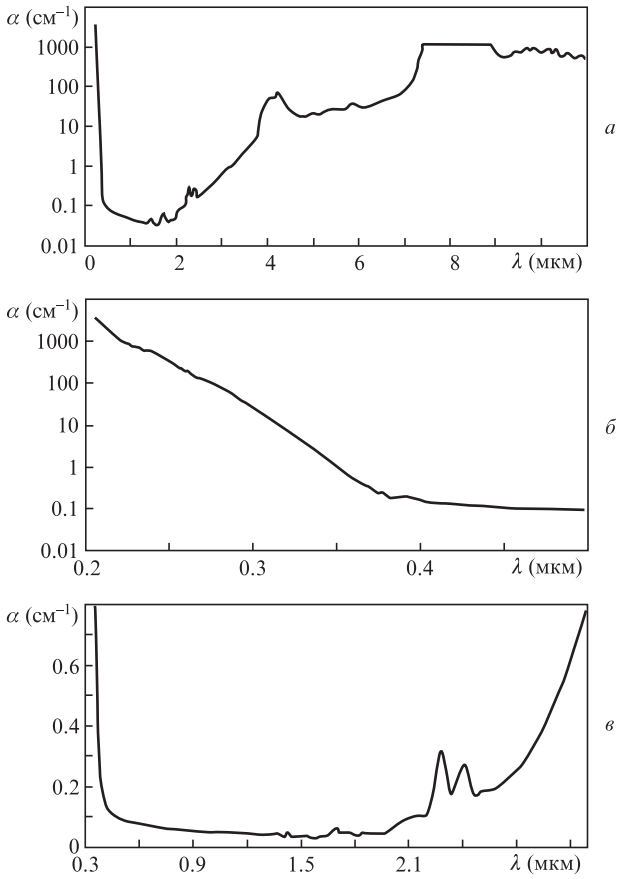


Рис.1. Спектры поглощения ФМ с разной детализацией.

чувствительности спектрометра ФСМ 2201 при измерении пропускания самой тонкой пленки ФМ на флюоритовой подложке. Здесь коэффициент пропускания был меньше 0.01, поэтому в данной области величина $\alpha(\lambda)$ не определена, но она превышает 1124 см$^{-1}$ на плато.

Из-за сильного поглощения ФМ, как покровная жидкость, при коротковолновом ЛИ может использоваться лишь в виде тонкого слоя. При спектральных исследованиях ФМ выяснилось, что с помощью ватной палочки на поверхности стекол легко наносятся слои толщиной от ~10 до ~50 мкм. Такие же пленки ФМ создавались и на титановых образцах – титановой фольге толщиной 50 мкм, а также на пластинах толщиной 0.5 мм из титана марки ВТ1-0. Дополнительной обработке в виде полировки образцы не подвергались.

Пленка ФМ толщиной 10 мкм может пропускать до 60% падающего излучения KrF-лазера. Измеренный нами коэффициент отражения R использованной титановой фольги на λ = 248 нм составил ~12%. По данным работы [30], в которой приведены спектры отражения титана для области энергий квантов излучения 3.5–10 эВ, для энергии 5 эВ (λ = 248 нм) коэффициент R = 10%. С учетом этих параметров на поверхности титановых подложек со слоем ФМ толщиной 10 мкм может поглощаться (без учета нелинейного поглощения) до 50% падающего ЛИ.

В данных экспериментах, как и в работе [22], излучение KrF-лазера генерировалось с использованием электронно-пучковой лазерной установки ЭЛА [31]. Характеристики ЛИ были следующими: энергия в однократных импульсах длительностью 80 нс составляла ~8 Дж, расходимость излучения – 10^{-2} рад. Распределение плотно-

сти энергии ЛИ на выходном окне лазера диаметром 5 см было однородным. С помощью плосковыпуклой линзы с фокусным расстоянием 40 см изображение окна проецировалось на облучаемый образец в пятно диаметром 9 мм. В проведенных экспериментах максимальные значения плотности энергии в пятне (далее флюенс F) достигали 10 Дж/см^2, а интенсивность J была равна 125 МВт/см^2. Энергия ЛИ в каждом импульсе контролировалась с помощью калориметра, на который заводилась часть лазерного пучка, отраженная от фокусирующей линзы. В контрольных импульсах этот тракт калибровался с помощью еще одного калориметра, измерявшего полную энергию ЛИ за линзой [22].

Эксперименты по лазерному синтезу C : F-нанопленок проводились при различных флюенсах ЛИ и разном числе импульсов. Сложность первых экспериментов заключалась в отсутствии возможности быстрой инструментальной характеризации получаемых после лазерного облучения покрытий. Приходилось полагаться лишь на визуальную оценку образующихся на титановых подложках отпечатков – их вида, цвета и его насыщенности. Для сравнения характеристик получаемых покрытий с характеристиками титановых образцов они облучались на воздухе не только при наличии слоя ФМ, но и без него.

Важнейшим параметром при лазерной обработке материалов является порог процесса по флюенсу или интенсивности ЛИ. При импульсной лазерной обработке металлов ключевой пороговой характеристикой является флюенс, с превышением которого происходит плавление поверхности образцов. В наших экспериментах оплавление чистых титановых пластинок и фольги после одного импульса KrF-ЭПЛ наблюдалось при $F > 1.6$ Дж/см^2. Визуально место оплавления легко определялось по изменению блеска поверхности.

В результате однократного воздействия на тонкий слой ФМ импульса ЛИ на титановой фольге и пластинах появлялись темные следы, порог возникновения F_m которых находился в области $F_m = 4\pm1$ Дж/см^2. Большой разброс значений F_m был обусловлен значительным разбросом в толщинах первичного слоя ФМ и его неровностями, которые из-за густоты масла очень медленно сглаживались. Стабильное появление темной пленки на титане при $F > F_m$ наблюдалось в случае воздействия двух импульсов ЛИ. При этом перед вторым импульсом сухой ватной палочкой по облучаемой поверхности титанового образца размазывались следы ФМ, оставшиеся после воздействия первого импульса. В этом случае толщина слоя ФМ была существенно меньше 10 мкм.

Основным объектом дальнейших исследований стало черное покрытие, полученное на титановой фольге после воздействия двух пар импульсов ЛИ на один участок слоя ФМ при $F \approx 7.5$ Дж/см^2 и описанном выше порядке нанесения масляных слоев перед каждым импульсом. Это покрытие было детально обследовано с использованием сканирующего электронного микроскопа (СЭМ), рамановского спектрометра и нанотвердомера.

С помощью электронного микроскопа исследовалась часть титановой полоски фольги с сегментом облученного круглого пятна диметром 9 мм. Этот кусочек вырезался обычными ножницами. Типичная структура необлученной поверхности использованной титановой фольги с разными увеличениями показана на рис.2. Видно, что поверхность испещрена полостями и кавернами разного размера.

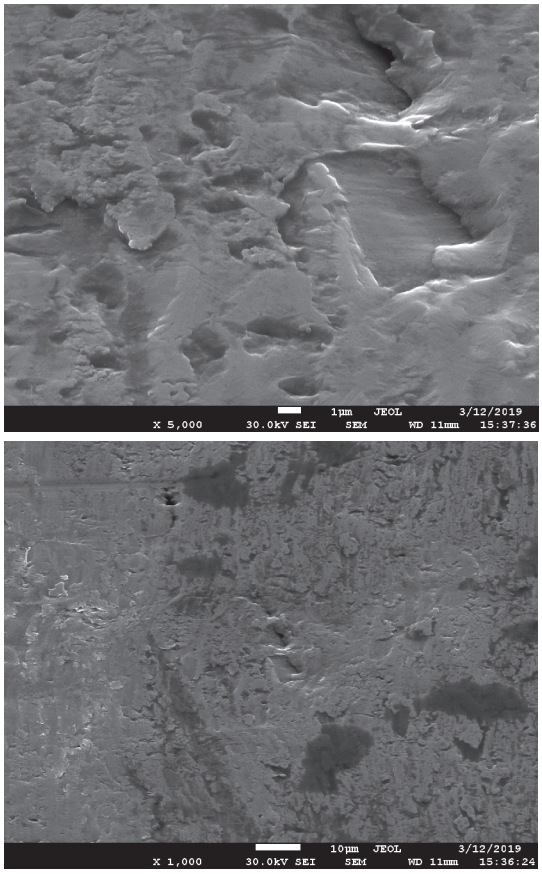
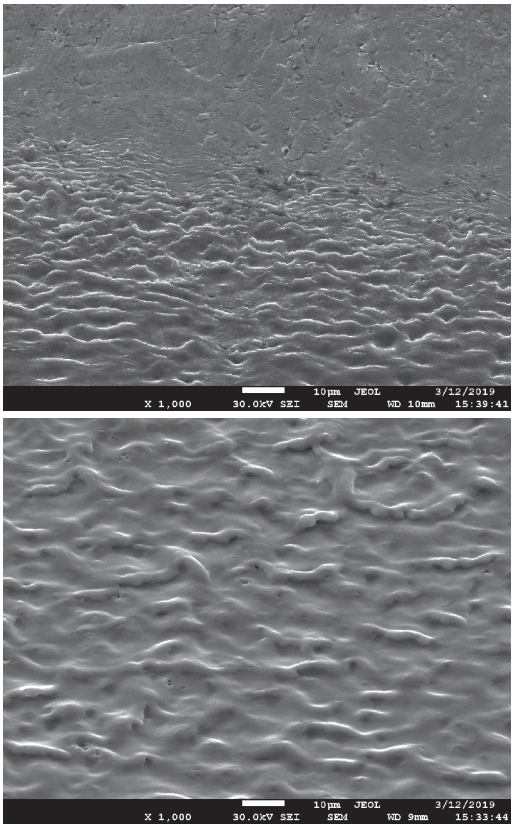


Рис.2. СЭМ-изображения исходной поверхности титановой фольги с разным увеличением

На рис.3,*а* представлена картина перехода от необлученной части фольги (верхняя область рисунка) к облученной четырьмя импульсами ЛИ под слоем ФМ области (нижняя часть рисунка с волнистой структурой). Отметим малую ширину переходной зоны, которая составляет ~50 мкм (диаметр пятна 9 мм). Такая четкость фокусировки изображения выходного окна лазера на облучаемой фольге означает малое рассеяние ЛИ в приповерхностной лазерной плазме. Отметим также, что высота гребней волн в переходной области облучения не превышает 3 мкм. Они имеют и достаточно четкую ориентацию параллельно границе облучения. Это указывает на то, что волны вызваны приповерхностным газовым потоком разгрузки из области лазерной плазмы.

Волнистая структура поверхности титановой фольги ближе к центру лазерного пятна имеет более хаотический характер (рис.3,*б*). Максимальная высота гребней волн здесь составляет ~5 мкм. На многих из этих волн видны точечные провалы от прохода газовых потоков, форма кромок которых позволяет утверждать, что эти газовые потоки были направлены внутрь образца в приповерхностные полости.

На рис.4 представлены два разных участка среза фольги в области с черным покрытием, образовавшимся после лазерного воздействия на слой ФМ. Видно, что на поверхности титана имеется некая пленка толщиной ~60 нм, а трещины и отслоения на ней находятся на расстоянии не более 1000 нм от деформированного ножницами среза титановой фольги. Это указывает на высокие прочностные характеристики нанопленки и ее хорошую связь с основой. Сравнение элементных составов поверх-



а

б

Рис.3. СЭМ-изображения границы (*а*) и центральной области (*б*) облученного четырьмя импульсами KrF-лазера участка титановой фольги со слоем ФМ.

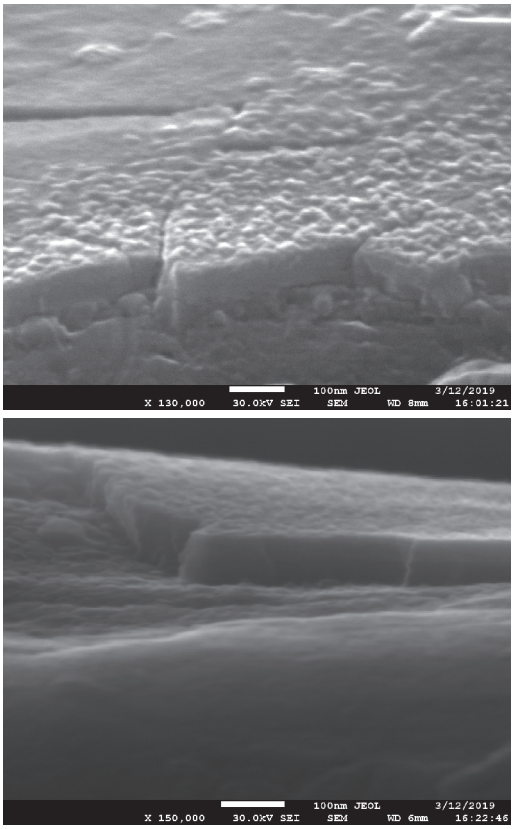


Рис.4. СЭМ-изображения двух разных участков среза титановой фольги с C:F-нанопленкой.

ности титановой фольги с синтезированной на ней нанопленкой и прилегающей к ней области методом рентгенофлуоресцентного анализа выявило фторуглеродный состав пленки с соотношением числа атомов C/F ≈ 1/2.3.

Прямое измерение механических свойств покрытий, образующихся на титановой фольге после облучения импульсами KrF-лазера, проводилось с использованием нанотвердомера НаноСкан-4D в Технологическом институт сверхтвердых и новых углеродных материалов. С помощью нанотвердомера осуществлялось наноиндентирование образцов по стандартной методике [32, 33]. На основе проведенных измерений были построены зависимости нанотвердости образцов H от глубины погружения индентора h и аналогичная зависимость модуля нормальной упругости E (модуль Юнга). На рис.5 представлены соответствующие результаты для четырех образцов титановой фольги. Два из них облучались на воздухе одним и двумя импульсами KrF-лазера, а два образца, покрытые слоем ФМ, – одним и четырьмя импульсами. Каждая точка на кривых получалась путем усреднения данных серии из примерно 10 измерений. Средний уровень погрешности измерений по всем результатам характеризуется соответствующими «полосами погрешностей» у экспериментальных точек на одной из кривых.

Представленные на рис.5 зависимости показывают, что модули упругости синтезированных с помощью ЛИ из ФМ фторуглеродных нанопокрытий и титановой фольги в пределах погрешности измерений практически не различаются. Видно, что модуль упругости (при индентировании близок модулю Юнга) у синтезированной C:F-нанопленки составляет ~130 ГПа. Это лишь в 2.3 раза меньше, чем у фторографена, и почти в 300 раз боль-

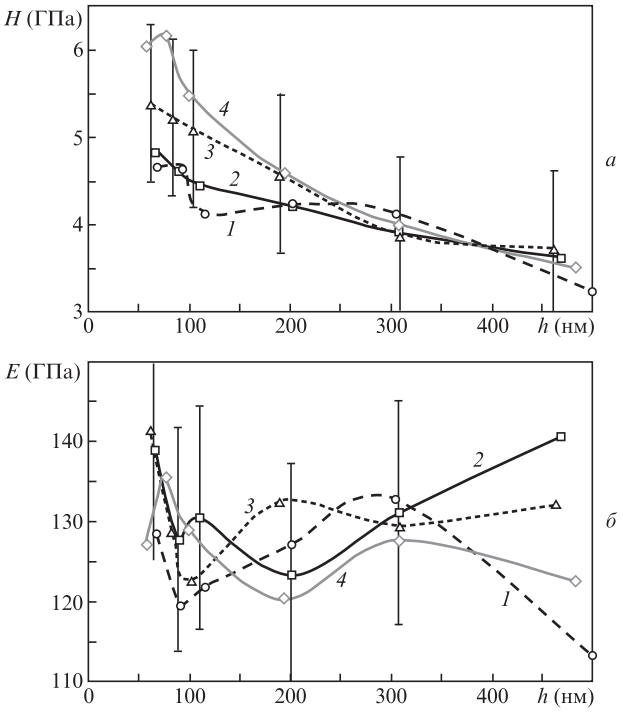


Рис.5. Зависимости нанотвердости H образцов титановой фольги со слоем ФМ на поверхности, облученных одним (*1*) и четырьмя (*2*) импульсами ЛИ, а также образцов фольги без слоя ФМ, облученных на воздухе одним (*3*) и двумя (*4*) импульсами, от глубины погружения индентора h (*а*). Аналогичные зависимости модуля нормальной упругости (модуль Юнга) E для тех же образцов (*б*).

ше, чем у обычного фторопласта. Стоит также отметить, что модифицированный поверхностный слой титана толщиной около 100 нм, образовавшийся на фольге при ее лазерном облучении на воздухе, имеет в 1.5–2 раза бóльшую твердость, чем материал подложки на большой глубине. Такое повышение твердости поверхностных слоев титана после лазерной и ионной обработки на воздухе в разных режимах отмечалось и ранее [34–37]. Данное совпадение может служить дополнительным подтверждением достоверности выполненных измерений величин H и E.

Часть облученных титановых образцов, со слоем ФМ и без него, исследовалась методом спектроскопии комбинационного рассеяния света (КРС). Измерения проводились с использованием спектрофотометра Renishaw inVia Raman Microscope (Великобритания). Длина волны излучения возбуждающего лазера в этом приборе равнялась 532 нм. На рис.6 показан спектр КРС титановой фольги с нанопленкой, полученной после воздействия на слои ФМ четырех импульсов KrF-лазера. Практически такой же спектр наблюдался и у нанопленки, образующейся при однократном облучении. Здесь же приведен спектр КРС поверхности фольги, облученной на воздухе двумя импульсами ЛИ при флюенсах 6.7 Дж/см^2. Для сравнения на рис.6 показан также спектр КРС использованного в данных экспериментах ФМ.

Характерные полосы КРС поверхности титана, облученной на воздухе, расположены в области $\Delta E <$ 1000 см$^{-1}$. Последовательно, по мере увеличения ΔE, это относительно слабая полоса вблизи 150 см$^{-1}$, которая указывает на наличие TiO_2 [38], а затем достаточно сильные и явно многокомпонентные полосы с общими максимуми вблизи 250 и 570 см$^{-1}$, очень похожие на полосы нитридов титана [39]. Присутствие TiO_2 и нитридов на поверхности титана с явным доминированием TiN_x указывает на одну из причин повышения твердости соответствующего слоя.

Спектр КРС C:F-нанопленки на титане имеет характерную для углеродных решеток двугорбую структуру с максимумами вблизи 1350 (D-полоса) и 1600 см$^{-1}$ (G-полоса). Ширины этих полос достаточно велики: примерно 160 и 130 см$^{-1}$ соответственно. Отношение их интенсивностей близко к единице. Данные характеристики указывают на аморфность графитоподобной углеродной решетки у исследуемой пленки с характерной длиной упорядочения ~15 Å [14]. В области $\Delta E <$ 1000 см$^{-1}$ у C:F-нанопленки наблюдаются еще две достаточно сильные и, очевидно, многокомпонентные полосы: с максимумом вблизи 630 см$^{-1}$ при ширине ~140 см$^{-1}$, а также вблизи 300 см$^{-1}$ с шириной ~200 см$^{-1}$. Их природа для нас пока не ясна.

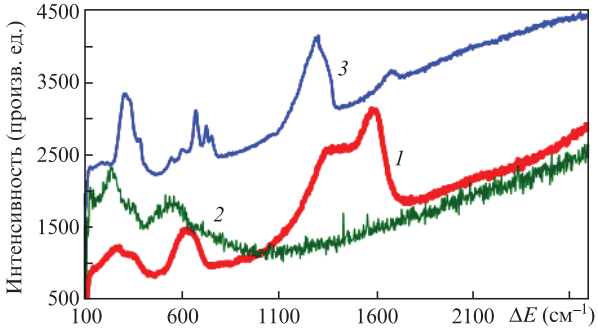


Рис.6. Спектры КРС C:F-нанопленки на титане (*1*), поверхности титановой фольги, облученной двумя импульсами KrF-лазера на воздухе (*2*) и ФМ (*3*); ΔE – рамановский сдвиг.

В спектре КРС ФМ выделяются четыре группы полос: первая, слабая, в области 1680 см$^{-1}$; вторая, сильная, с максимумом вблизи 1300 см$^{-1}$; третья, изрезанная, с наиболее сильной полосой вблизи 675 см$^{-1}$; четвертая, сильная, с максимумом вблизи 330 см$^{-1}$. Сравнение этих групп полос ФМ с полосами C:F-нанопленки наводит на мысль, что процессы, определяющие трансформацию первых двух полос ФМ в G- и D-полосы нанопленки, могут определять и соответствующую трансформацию двух других полос. Такое предположение требует дальнейшего детального изучения, что, однако, выходит за рамки настоящей статьи.

3. Заключение

Основным результатом представленной работы является доказательство возможности синтеза фторуглеродной нанопленки на поверхности титана при отжиге на воздухе тонкого, менее 10 мкм, покровного слоя ФМ импульсами излучения KrF-ЭПЛ. При этом прочностные характеристики получаемых C:F-нанопленок оказываются сравнимыми с аналогичными характеристиками титана, которые в сотни раз превосходят характеристики фторопласта Ф-4. Процесс нанесения тонких покровных слоев ФМ на титановые поверхности, как и их последующий отжиг на воздухе лазерным излучением, прост, удобен и не требует дополнительного дорогостоящего оборудования. Он может служить основой технологии пошагового нанесения на большие площади титановых изделий защитных высокопрочных фторуглеродных нанопленочных покрытий. При этом показано, что чистое ФМ, в силу его высокой прозрачности, можно использовать как покровную жидкость в виде слоев разной толщины при модификации поверхности титана излучениями практически всех технологических лазеров с длинами волн от 0.25 до 10.6 мкм. ФМ является первым представителем широкого класса фторуглеродных жидкостей, которые также могут использоваться в качестве покровных при лазерной обработке различных материалов.

Авторы благодарят Я.К.Скасырского за помощь в проведении спектральных измерений.

1. Баскин З.Л., Шабалин Д.А., Выражейкин Е.С., Дедов С.А. *Рос. хим. журн.*, **52** (3), 13 (2008).
2. Бейдер Э.Я., Донской А.А., Железина Г.Ф., Кондрашов Э.К., Сытый Ю.В., Сурнин Е.Г. *Рос. хим. журн.*, **52** (3), 30 (2008).
3. Nair R.R., Ren W.C., Jalil R., Riaz I., Kravets V.G., Britnell L., Blake P., Schedin F., Mayorov A.S., Yuan S., Katsnelson M.I., Cheng H.M., Strupinski W., Bulusheva L.G., Okotrub A.V., Grigorieva I.V., Grigorenko A.N., Novoselov K.S., Geim A.K. *Small*, **6**, 2877 (2010).
4. https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/smll.201001555.
5. Karlicky F., Otyepka M. *Ann. Phys.*, **526** (9-10), 408 (2014).
6. Никитин Л.Н., Галлямов М.О., Саид-Галиев Э.Е., Хохлов А.Р., Бузник В.М. *Рос. хим. журн.*, **52** (3), 56 (2008).
7. Жук А.В., Сонненберг Н. Патент РФ № 0002608482 от 18.01.2017.
8. Шведов А.В., Елинсон В.М., Щур П.А., Кириллов Д.В. *Вакумная техника и технология*, **29** (2), 36 (2019).
9. Фадеева Ю.В., Окотруб А.В. *Журн. структ. химии*, **59** (4), 787 (2018).
10. Спицын Б.В., Алексенко А.Е. *Защита металлов*, **43** (5), 456 (2007).
11. Grill A. *Diam. Relat. Mater.*, **8**, 428 (1999).
12. Конов В.И. *Квантовая электроника*, **45** (11), 1043 (2015) [*Quantum Electron.*, **45**, 1043 (2015).

13. Kuan-I Ho et al. *Sci. Rep*., **4**, 5893 (2014).
14. Robertson J. *Mater. Sci. Eng. R*, **37**, 129 (2002).
15. Gorbunov A.A., Konov V.I. *Surf. Coat. Technol*., **47**, 503 (1991).
16. Voevodin A.A., Donley M.S. *Surf. Coat. Technol*., **82**, 199 (1996).
17. Конов В.И., Углов С.А. *Квантовая электроника*, **25** (4), 291 (1998) [*Quantum Electron.*, **28** (4), 281 (1998)].
18. Большаков А.П., Востриков В.Г., Дубровский В.Ю., Конов В.И., Косырев Ф.К., Наумов В.Г., Ральченко В.Г. *Квантовая электроника*, **35** (4), 385 (2005) [*Quantum Electron.*, **35**, 385 (2005)].
19. Тверьянович Ю.С., Маньшина А.А., Тверьянович А.С. *Успехи химии*, **81** (12), 1091 (2012) [*Russ. Chem. Rev*., **81** (12), 1091 (2012)].
20. Лялин А.А., Симакин А.В., Бобырев В.А., Лубнин Е.Н., Шафеев Г.А. *Квантовая электроника*, **27** (1), 73 (1999) [*Quantum Electron.*, **29** (4), 355 (1999)].
21. Симакин А.В., Лубнин Е.Н., Шафеев Г.А. *Квантовая электроника*, **30** (3), 263 (2000) [*Quantum Electron.*, **30**, 263 (2000)].
22. Сергеев П.Б., Морозов Н.В., Кириченко А.Н. *Квантовая электроника*, **48** (2), 136 (2018) [*Quantum Electron.*, **48**, 136 (2018)].
23. Бармина Е.В., Серков А.А., Шафеев Г.А. *Квантовая электроника*, **43** (12), 1091 (2013) [*Quantum Electron.*, **43**, 1091 (2013)].
24. De Bonis A., Sansone M., D'Allesio L., Galasso A., Santagata A., Teghil R. *J. Phys. D: Appl. Phys*., **46**, 445301 (2013).
25. Lam J., Amans D., Chaput F., Diouf M., Ledoux G., Mary N., Masenelli-Variot K., Motto-Ros V., Dujardin C. *Phys. Chem. Chem. Phys*., **16**, 963 (2014).
26. Ионин А.А., Кудряшов С.И., Левченко А.О., Макаров С.В., Сараева И.Н., Руденко А.А., Буцень А.В., Бураков В.С. *Письма в ЖЭТФ*, **106** (4), 247 (2017) [*JETP Lett*., **106** (4), 268 (2017)].
27. Kudryashov S.I., Samokhvalov A.A., Nastulyavichus A.A., Saraeva I.N., Mikhailovskii V.I., Ionin A.A., Veiko V.P. *Materials*, **12**, 562 (2019).
28. Кочуев Д.А., Хорьков К.С., Абрамов Д.В., Аракелян С.М., Прокошев В.Г. *Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования*, № 12, 81 (2018).
29. Theye M.-L., Paret V., Sadki A. *Diam. Rel. Mater*., **10**, 182 (2001).
30. Иванов С.Н., Локтионов Е.Ю., Протасов Ю.Ю. *Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Естественные науки*, № 1, 25 (2010).
31. Sergeev P.B. *J. Sov Laser Res*., **14** (4), 237 (1993).
32. Useinov A.S., Kravchuk K.S., Rusakov A.A., Krasnogorov I.V., Kuznetsov A.P., Kazieva T.V. *Phys. Procedia*, **72**, 194 (2015).
33. Усейнов А.С., Русаков А.А., Яковлев В.И., Гладких Е.В. *Наноиндустрия*, № 1, 66 (2020).
34. Морозова Е.А., Муратов В.С. *Вестник ТГУ*, **15** (3), 862 (2010).
35. Горунов А.И., Гильмутдинов А.Х. *Изв. вузов. Порошковая металлургия и функциональные покрытия*, **4**, 40 (2015).
36. Lavisse L., Berger P., Cirisan M., Jouvard J.M., Bourgeois S., Marco de Lucas M.C. *J. Phys. D: Appl. Phys*., **42**, 245303 (2009).
37. Чернов И.П., Белоглазова П.А., Березнеева Е.В., Киреева И.В., Пушилина Н.С., Ремнев Г.Е., Степанова Е.Н. *ЖТФ*, **85** (7), 95 (2015) [*Techn. Phys. J*., **60** (7), 1039 (2015)].
38. Шульга Ю.М., Матюшенко Д.В., Голышев А.А., Шахрай Д.В., Молодец А.М., Кабачков Е.Н., Куркин Е.Н., Домашнев И.А. *Письма в ЖТФ*, **36** (18), 26 (2010) [*Techn. Phys. Lett*., **36** (9), 841 (2010)].
39. Spengler W., Kaiser R., Christensen A.N., Muller-Vogt G. *Phys. Rev. B*, **14**, 1095 (1978).

ПОПРАВКА

Н.Н.Евтихиев, Е.Ю.Злоказов, В.В.Краснов, В.Г.Родин, Р.С.Стариков, П.А.Черёмхин. Высокоскоростная оперативная реализация голографических и дифракционных элементов с применением микрозеркальных пространственно-временных модуляторов света (Квантовая электроника, 2020, т. 50, № 7, с. 667–674).

В последнем абзаце статьи на с. 674 допущена ошибка в номере гранта Российского научного фонда.

Правильно: грант № 19-19-00498.