

ВОЗДЕЙСТВИЕ ЛАЗЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ НА ВЕЩЕСТВО

Измерение порога абляции алюминиевых наночастиц, покрытых оксидной пленкой, под действием фемтосекундных лазерных импульсов

О.В.Чефонов, А.В.Овчинников, И.В.Ильина, М.Б.Агранат

Представлены результаты экспериментов по оценке пороговой интенсивности фемтосекундного лазерного излучения, при котором происходит удаление наночастиц с поверхности подложки. Исследования проводились с наночастицами, полученными методом фемтосекундной лазерной абляции чистого алюминия в дистиллированной воде. Измерены спектры ослабления (или экстинкции, т. е. поглощения и рассеяния) наночастиц при комнатной температуре в УФ и оптическом диапазонах длин волн. Получены оценки размеров наночастиц с помощью атомно-силовой микроскопии. Предложен новый метод сканирующей фотолюминесценции для оценки порога удаления наночастиц с поверхности стеклянной подложки при воздействии фемтосекундных лазерных ИК импульсов с интенсивностями 10^{11} – 10^{13} Вт/см².

Ключевые слова: фемтосекундный лазерный импульс, люминесценция, наночастицы.

1. Введение

Микро- и наноструктурирование алюминия [1–3], а также получение наночастиц и нанокластеров алюминия представляет не только научный, но и практический интерес. Алюминий является наиболее дешевым из плазмонных материалов (золото, серебро и др.) и характеризуется относительно низкой температурой плавления, что значительно упрощает синтез наночастиц [2]. При этом область возможных применений алюминиевых наночастиц непрерывно расширяется: благодаря своим оптическим характеристикам они могут использоваться в плазмонике [4–6] и оптоэлектронике (в качестве ослабителей мощности [2], в усиленной металлом флуоресценции для детектирования биомолекул [7, 8] и в поверхностно-усиленной рамановской спектроскопии [9]), а также в составе усовершенствованных топлив [10] (в частности, в ракетном топливе [11]), т. к. обладают повышенными теплоотдачей (при экзотермической реакции окисления) и вероятностью возгорания [11].

Среди множества разработанных к настоящему времени методов получения наночастиц и нанокластеров алюминия [2, 5, 12] лазерная абляция имеет несколько существенных преимуществ [12], т. к. позволяет синтезировать наночастицы с различными размерами и структурой (в том числе полые [13, 14]), с высокой степенью чистоты и узким распределением по размерам. В качестве источников излучения при лазерной абляции алюминия могут применяться наносекундные [15], пикосекундные [16] и фемтосекундные [2, 16–18] лазеры. Преимуществом использования последних является возможность минимизировать окисление поверхности наночастиц [13, 16] путем уменьшения времени взаимодействия алюминия с окружающей жидкостью.

Морфология получаемых при лазерной абляции наночастиц и степень их окисления зависят не только от параметров лазерного излучения (длины волны, длительности импульса, интенсивности), но и от типа применяемого раствора (несмотря на то что лазерная абляция алюминия возможна также в вакууме и в воздухе, сбор синтезированных в жидкости наночастиц наиболее удобен). Для лазерной абляции и получения алюминиевых наночастиц и нанокластеров в качестве растворителей использовались вода [15, 16], этанол [16, 19], ацетон и этиленгликоль [19], полярные и неполярные органические растворители типа хлороформа и тетрахлометана соответственно [20], а также неионные полимеры и анионные поверхностно-активные вещества [21]. Использование ацетона вместо этанола способствует образованию наночастиц меньшего размера с более узким распределением по размерам [21]. Наличие газа, растворенного в жидкости, также влияет на структуру получаемых наночастиц [13]. Так, насыщение жидкости водородом приводит к формированию полостей в наночастицах [14]. Получение наночастиц оксида алюминия (Al_2O_3) также представляет практический интерес ввиду особенностей последнего – высокой стабильности, прочности, прозрачности и очень хороших изоляционных свойств.

В настоящей работе мы приводим результаты экспериментов по определению интенсивности лазерного излучения, при которой происходит удаление наночастиц, полученных методом фемтосекундной лазерной абляции алюминия в дистиллированной воде, с поверхности стеклянной подложки при воздействии фемтосекундных лазерных ИК импульсов. Предложен и реализован новый оригинальный метод фемтосекундной сканирующей фотолюминесценции для диагностики наличия наночастиц на поверхности подложки.

2. Синтез наночастиц

Синтез наночастиц осуществлялся методом фемтосекундной лазерной абляции массива чистого алюминия, погруженного в дистиллированную воду. Этот метод позволяет получить химически чистые наночастицы, кото-

О.В.Чефонов, А.В.Овчинников, И.В.Ильина, М.Б.Агранат. Объединенный институт высоких температур РАН, Россия, 125412 Москва, ул. Ижорская, 13, стр.2; e-mail: ovtch2006@yandex.ru

Поступила в редакцию 13 ноября 2015 г., после доработки – 25 января 2016 г.

рые свободны от поверхностно-активных веществ и могут быть использованы в дальнейших исследованиях без дополнительной подготовки и очистки (в отличие от широко применяемых химических методов синтеза).

Получаемые при абляции чистого алюминия в дистиллированной воде алюминиевые наночастицы в водном растворе преобразуются либо полностью в наночастицы оксида алюминия, либо в наночастицы алюминия, покрытые тонкой оболочкой оксида алюминия за счет взаимодействия с кислородом. Степень окисления наночастиц алюминия зависит от длительности импульса и длины волны лазерного излучения. При использовании фемтосекундных лазерных импульсов толщина образовавшейся на поверхности алюминиевой наночастицы оксидной оболочки не превышает толщины оксидной пленки при естественном окислении алюминия и предотвращает дальнейшее образование оксидной пленки. Лазерное УФ излучение, длина волны которого близка к длине волны плазмонного резонанса синтезируемых наночастиц, может вызывать их дополнительный нагрев, что приводит к более эффективному взаимодействию со средой, в которой находятся наночастицы, и, как следствие, к полному их окислению [16, 22].

Таким образом, синтез металлических алюминиевых наночастиц предпочтительней осуществлять в бескислородных жидкостях при воздействии фемтосекундных лазерных импульсов излучения с длиной волны, отличающейся от длины волны плазмонного резонанса генерируемых наночастиц.

В качестве источника лазерных импульсов использовалась фемтосекундная лазерная система с активной средой на основе кристалла вольфрамата, активированного ионами иттербия (Yb:KYW) (лазерная система ТЕТА, Авеста-Проект). Фемтосекундная лазерная система обеспечивала генерацию лазерных импульсов длительностью 285 фс на длине волны $\lambda = 1028$ нм, которые далее с помощью нелинейного оптического кристалла преобразовывались в импульсы с длиной волны излучения $\lambda = 514$ нм (вторая гармоника) и максимальной энергией 6 мкДж. Частота следования лазерных импульсов составляла 5 кГц.

Фокусировка лазерного излучения на мишень осуществлялась микрообъективом ЛОМО $10\times$ с числовой апертурой $NA = 0.25$. Размер фокального пятна лазерного излучения на мишени определялся по методике [23], согласно которой сначала строится зависимость квадрата радиуса кратера абляции массива кремния от логарифма энергии единичного лазерного импульса, а далее по данным линейной аппроксимации экспериментальных точек определяется параметр r_0 гауссова пучка. Для $\lambda = 514$ нм поперечный размер фокального пятна составил 2.2 мкм по уровню $1/e$ от максимума интенсивности, а пороговая плотность энергии, при которой происходит абляция кремния, была равна 0.52 ± 0.06 Дж/см².

В качестве мишени для синтеза наночастиц использовалась плоскопараллельная полированная пластинка чистого алюминия марки А999 толщиной 500 мкм и площадью 1 см². Мишень располагалась в чашке Петри, которая была заполнена дистиллированной водой объемом 5 мл. Ввод лазерного излучения осуществлялся через вклеенное в дно чашки Петри кварцевое стекло толщиной 170 мкм. При этом толщина слоя жидкости между кварцевым стеклом и мишенью составляла 2 мм. Чашка Петри с мишенью устанавливалась на двухкоординатный программно-управляемый моторизованный предметный сто-

лик инвертированного микроскопа, который непрерывно перемещался по заданной траектории в течение действия лазерных импульсов на мишень. Синтез наночастиц проводился при плотности энергии падающего на поверхность алюминиевой мишени лазерного излучения, равной 32 Дж/см². Время синтеза составило 2.5 ч.

Для дальнейших исследований и уменьшения дисперсии наночастиц по размерам исходный водный раствор, содержащий крупномасштабные продукты абляции алюминиевой мишени и наночастицы, был подвергнут двухстадийному центрифугированию с частотой оборотов центрифуги 3000 об./мин. Продолжительность одной стадии центрифугирования составляла 20 мин.

3. Спектры ослабления наночастиц

Для изучения оптических и плазмонных свойств полученных наночастиц были проведены измерения спектров ослабления наночастиц, находящихся в растворе дистиллированной воды, в УФ и видимом диапазонах длин волн. С помощью спектрофотометра СФ-26 сначала был измерен коэффициент пропускания наночастиц T , равный отношению интенсивности потока излучения I , прошедшего через кювету с раствором наночастиц в дистиллированной воде, к интенсивности потока излучения I_0 , прошедшего через кювету с дистиллированной водой без наночастиц, а далее построены зависимости величины ослабления $1 - T$ от длины волны. На рис.1 приведены спектры ослабления синтезированных наночастиц алюминия до и после центрифугирования. Видно, что после этой процедуры спектр ослабления наночастиц становится более узким по сравнению с начальным спектром, а длинноволновая часть спектра (450–800 нм) сдвигается в область более коротких длин волн (300–450 нм). При этом максимум в спектре ослабления на $\lambda = 200$ нм становится ярко выраженным, и начинает проявляться спектральная особенность в окрестности $\lambda = 250$ нм.

Как показывают теоретические расчеты спектров поглощения водного раствора сферических алюминиевых наночастиц [24], пик плазмонного резонанса для частиц диаметром 10 нм соответствует $\lambda \approx 200$ нм, а его смещение в длинноволновую область связано с увеличением поперечного размера наночастиц [6, 24, 25]. С другой стороны, к красному сдвигу плазмонного резонанса алюминиевых наночастиц может приводить их оксидирование,

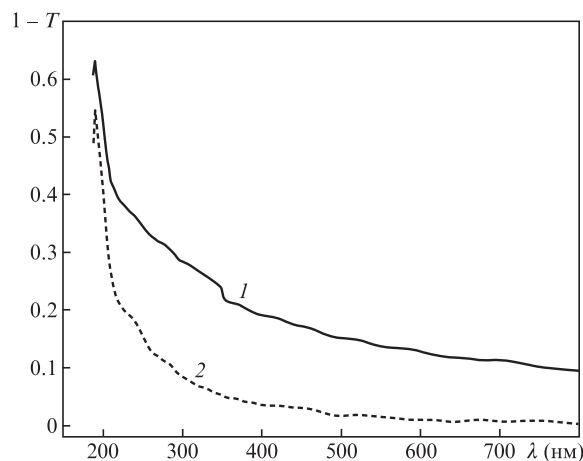


Рис.1. Экспериментальные спектры ослабления наночастиц алюминия до (1) и после (2) центрифугирования.

поскольку показатель преломления оксида алюминия в УФ диапазоне длин волн больше, чем у воды. Так, для водного раствора наночастиц оксида алюминия размером 20–50 нм максимум спектра поглощения соответствует $\lambda = 210$ нм [26]. Как правило, толщина оксидного слоя на алюминиевой наночастице составляет 1.7–6.0 нм и не зависит от ее размера [27].

Таким образом, исходя из результатов измерений спектров ослабления и анализа работ, выполненных ранее, можно предположить, что в процессе фемтосекундной лазерной абляции алюминия в дистиллированной воде нами были получены алюминиевые наночастицы, покрытые тонким слоем оксидной пленки.

4. Оценка размеров наночастиц

На рис.2 представлено трехмерное изображение топографии поверхности подложки с нанесенными наночастицами, полученное с помощью атомно-силового микроскопа (АСМ) полуконтактным методом исследования поверхности. Образец был подготовлен путем высушивания капли водного раствора алюминиевых наночастиц на подложке из слюды.

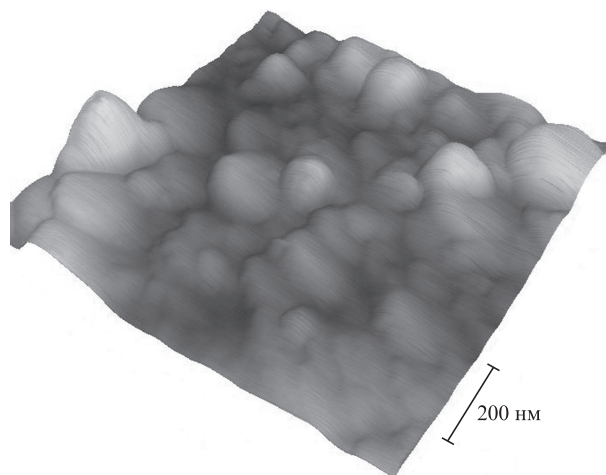


Рис.2. Трехмерное АСМ-изображение поверхности подложки с наночастицами.

На рис.3 приведены АСМ-изображения топографии поверхности подложек с наночастицами и профили сечения этой поверхности, построенные вдоль соответствующих линий.

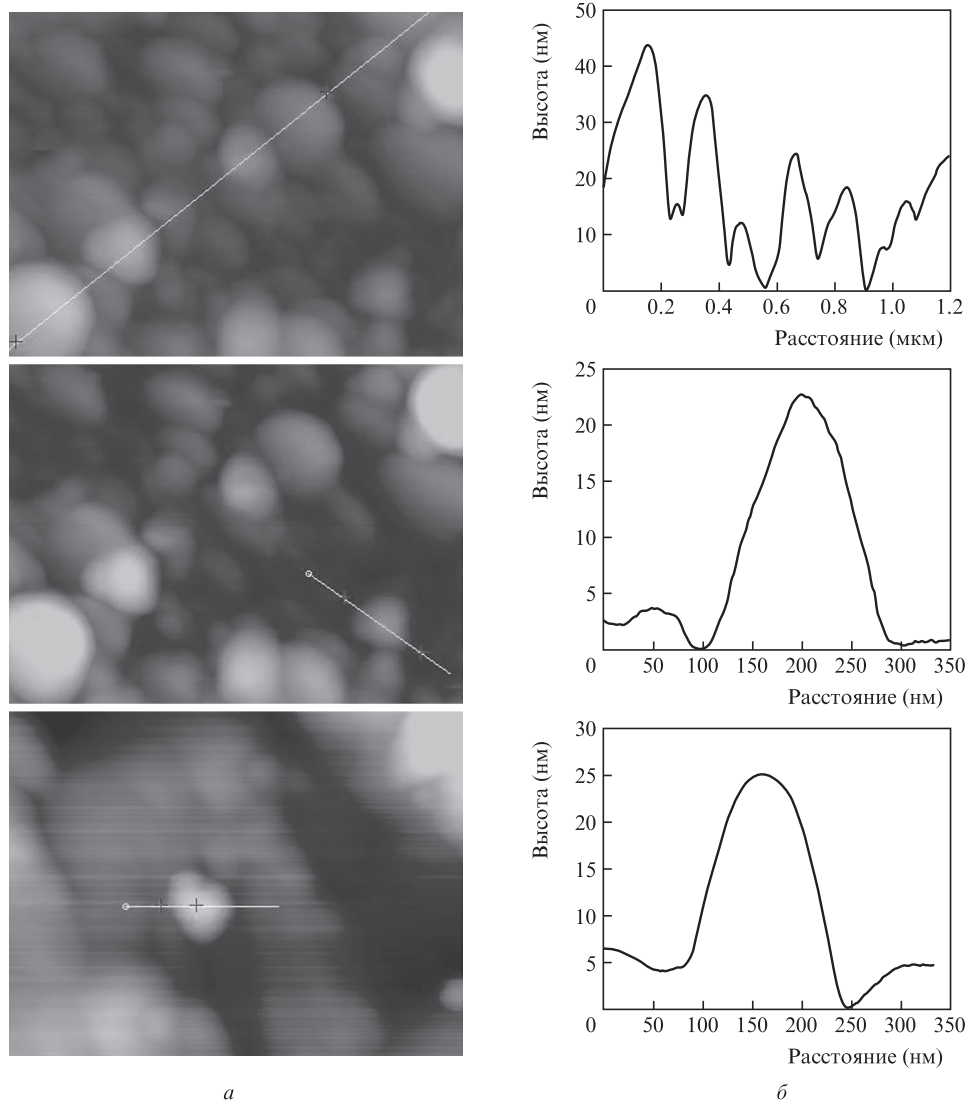


Рис.3. АСМ-изображения топографии поверхности подложек с наночастицами (а) и профили сечения этой поверхности (б), построенные вдоль соответствующих линий на рис.3.а.

Несмотря на то что атомно-силовая микроскопия позволяет достичь высокого пространственного разрешения, полученные данные о рельефе исследуемой поверхности не всегда могут адекватно отображать реальные особенности поверхности. Это связано в первую очередь с тем, что АСМ-изображения полностью отличаются (по физике процессов, лежащих в основе получения изображений) от изображений, сформированных с помощью традиционного оптического или электронного микроскопа, для которых исключено влияние инструмента исследования на объект и отсутствуют артефакты изображений. По сути можно выделить следующие источники артефактов АСМ-изображений: зонд, нелинейность перемещения позиционера (сканера), внешние вибрации, помехи в цепи обратной связи, ошибки в программном обеспечении для обработки изображений. Наиболее распространенными артефактами атомно-силовой микроскопии являются артефакты, связанные с зондом: эффект «уширения профиля», обусловленный конволюцией формы зонда с формой объекта (размер зонда больше или сравним с размером объекта), и эффект «занижения высот», обусловленный упругой деформацией исследуемых объектов.

В наших измерениях использовался полуконтактный (прерывисто-контактный) метод сканирования, при котором зонд контактирует с поверхностью образца в процессе колебаний не постоянно, а только в течение малой части периода колебаний. Данный метод широко применяется в исследованиях наноструктурированных поверхностей и имеет определенные преимущества по сравнению с контактными методами. Прежде всего, при использовании этого метода давление зонда на поверхность образца существенно меньше, что позволяет работать с более мягкими и легко разрушающимися материалами. Основным артефактом полуконтактного метода будет являться эффект «уширения профиля», т.е. поперечный размер выступающих объектов на поверхности образца будет значительно больше реального и его значение может использоваться только как верхняя граница для оценок истинного размера. Однако высота объектов будет определена достаточно точно. Анализируя данные, представленные на рис.3, можно сделать вывод, что диаметр синтезированных наночастиц составляет порядка 10–45 нм.

5. Измерение порога удаления наночастиц с поверхности подложки

Для измерения пороговой интенсивности фемтосекундного лазерного импульса, при которой происходит удаление синтезированных наночастиц с поверхности стеклянной подложки, был предложен и реализован метод фемтосекундной сканирующей фотолюминесценции.

Суть метода заключается в последовательном измерении интегральной по спектру и времени интенсивности фотолюминесценции наночастиц в одной и той же области на подложке и в одном и том же спектральном диапазоне длин волн до и после воздействия нагревающего лазерного импульса, а также в последующем анализе отношения интегральных интенсивностей фотолюминесценции до и после воздействия в зависимости от плотности энергии нагревающего лазерного импульса или его интенсивности.

Хорошо известна одно-, двух- и многофотонная люминесценция массивов и наночастиц d-металлов, возникающая при воздействии на них нано- и фемтосекундных

лазерных импульсов [23, 28–30]. В ряде работ проведены исследования по однофотонному возбуждению люминесценции оксида алюминия УФ излучением [31–33]. В случае алюминиевых наночастиц, покрытых оксидной пленкой, при воздействии фемтосекундных лазерных ИК импульсов в результате многофотонного поглощения в оболочке оксида алюминия будет возбуждена люминесценция, которая является своеобразным маркером, определяющим наличие наночастицы.

Возбуждение фотолюминесценции наночастиц осуществлялось за счет многофотонного поглощения ИК излучения лазера ТЕМА (Авеста-Проект) на $\lambda = 1048$ нм с длительностью импульса 110 фс, энергией в импульсе около 3 нДж и частотой следования импульсов 71 МГц [28, 29]. Энергия зондирующего фемтосекундного лазерного импульса выбиралась достаточной для того, чтобы, во-первых, обеспечить максимальный выход квантов фотолюминесценции наночастиц и не повредить область с наночастицами на подложке, а во-вторых, чтобы при воздействии лазерного импульса на чистую подложку без наночастиц фотолюминесценция отсутствовала. Лазерное излучение фокусировалось на образец микрообъективом ЛОМО 20 \times с числовой апертурой $NA = 0.4$ в пятно диаметром ~ 2 мкм. Максимальная плотность энергии на образце достигала 60 мДж/см 2 с учетом пропускания оптических элементов оптической схемы.

Излучение фотолюминесценции, собранное микрообъективом, направлялось на входную щель спектрографа Acton SP2300i. В спектрографе была установлена нарезная дифракционная решетка (50 штрих./мм, Richardson gratings) с максимальной эффективностью отражения на $\lambda = 600$ нм. Использование решетки с небольшим количеством штрихов позволяло регистрировать спектры в диапазоне 400–650 нм за одно измерение. Границы спектрального диапазона определялись чувствительностью детектора в красной области спектра и эффективностью дифракционной решетки в синей области. В качестве детектора излучения использовалась высокочувствительная охлаждаемая ПЗС-камера с усилителем яркости (PI-MAX). В спектрометрическом тракте между микрообъективом и щелью спектрографа был установлен полосовой фильтр, защищающий ПЗС-камеру от лазерного излучения на $\lambda = 1048$ нм. Время экспозиции одного кадра ПЗС-камеры составляло 25 мс. Накопление сигнала осуществлялось путем сложения 40 экспозиций.

Двумерные изображения спектров суммировались по пространственной координате в полосе длин волн 500–650 нм. Ширина полосы (по пространственной координате) выбиралась немного большей размера пятна фотолюминесценции.

Образец для исследования подготавливался следующим образом. На стерильную стеклянную плоскопараллельную пластинку толщиной 170 мкм высаживалась капля водного раствора алюминиевых наночастиц объемом 10 мкл, которая потом высушивалась в ламинарном шкафу FASTER TWO-30 в условиях беспылевой воздушной среды.

В качестве источника нагревающих лазерных импульсов использовалась фемтосекундная лазерная система ТЕМА (Авеста-Проект), которая работала в режиме генерации одиночных лазерных импульсов. Для этого в экспериментальной схеме применялся селектор импульсов, состоящий из электрооптического модулятора, установленного между двумя скрещенными призмами Глана–

Томпсона, высоковольтного генератора, блока временных задержек и блока управления. Регулировка энергии лазерного импульса в диапазоне от нескольких единиц наноджоулей до единиц микроджоулей обеспечивалась поляризационным ослабителем, который состоял из полуволновой пластины и призмы Глана–Томпсона. Измерения энергии лазерного импульса проводились с помощью калориметра и калиброванного фотодиода с набором нейтральных светофильтров.

Нагревающее лазерное излучение фокусировалось на образец тем же самым микрообъективом, что и при возбуждении фотолюминесценции, но размер пятна нагревающего лазерного излучения был в четыре раза больше размера пятна излучения лазера, возбуждающего люминесценцию. Это было сделано для того, чтобы гарантировано обеспечить попадание зондирующего лазерного импульса в область воздействия нагревающего лазерного импульса. Для изменения размера лазерного пятна на образце использовался телескоп, собранный по схеме Галилея, который изменял расходимость лазерного излучения. Диаметр пятна нагревающего лазерного излучения в плоскости образца составил ~ 8 мкм.

Каждая новая пара спектров (до и после воздействия нагревающего импульса) при определенной плотности энергии нагревающего лазерного импульса измерялась в новом месте образца. В экспериментах максимальная энергия нагревающего лазерного импульса ограничивалась энергией, при котором начиналось разрушение стеклянной подложки с нанесенными на нее наночастицами.

Исследование порога удаления в воздухе наночастиц, нанесенных на стеклянную подложку, при воздействии фемтосекундных лазерных ИК импульсов было проведено для трех различных длительностей нагревающих лазерных импульсов: 270, 540 и 750 фс, в одном диапазоне энергий. На рис.4 и 5 приведены отношения интенсивности люминесценции наночастиц после воздействия нагревающего лазерного импульса I_{fin} к интенсивности люминесценции до воздействия I_{in} в зависимости от интенсивности и плотности энергии нагревающего лазерного импульса при его разных длительностях.

Из рис.4 видно, что все экспериментальные точки лежат на одной кривой при различных длительностях нагре-

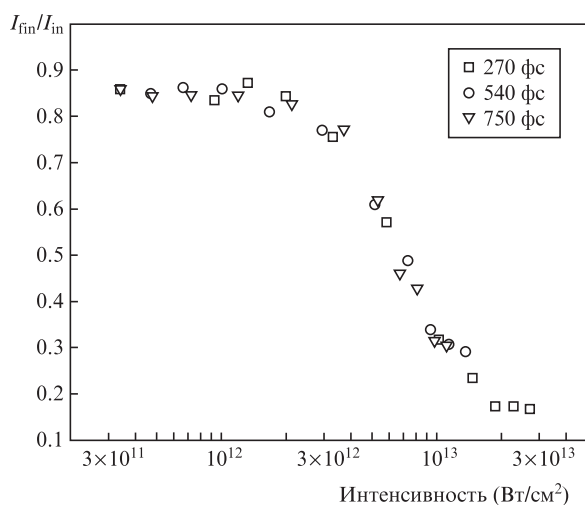


Рис.4. Зависимости отношения $I_{\text{fin}}/I_{\text{in}}$ интенсивностей люминесценции наночастиц после и до воздействия нагревающего лазерного импульса от интенсивности этого импульса при его различных длительностях.

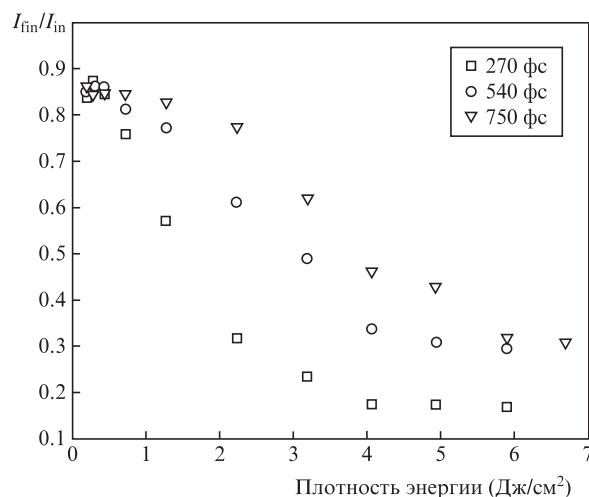


Рис.5. Зависимости отношения $I_{\text{fin}}/I_{\text{in}}$ интенсивностей люминесценции наночастиц после и до воздействия нагревающего лазерного импульса от плотности энергии этого импульса при его различных длительностях.

вающего лазерного импульса. Уменьшение выхода многофотонной фотолюминесценции наночастиц связано с изменением их числа в области воздействия и происходит при одинаковой интенсивности и различных длительностях импульсов. Незначительный уровень фотолюминесценции при интенсивностях свыше 1.5×10^{13} Вт/см² возможно связан с легированием модифицированной поверхности подложки небольшим числом наночастиц. При интенсивностях нагревающего импульса менее 10^{12} Вт/см² наблюдается небольшое снижение выхода люминесценции, которое является следствием модификации наночастиц и изменения их пространственного распределения в области воздействия нагревающего лазерного импульса [23].

6. Заключение

В настоящей работе методом фемтосекундной лазерной абляции поверхности чистого алюминия в дистиллированной воде были синтезированы наночастицы размером 10–45 нм (с помощью АСМ). Измерен спектр пропускания водного раствора с наночастицами. Реализован новый метод фемтосекундной сканирующей многофотонной фотолюминесценции, с помощью которого получены новые данные об интенсивности фемтосекундного лазерного ИК импульса ($\sim 10^{12}$ Вт/см²), при которой происходит удаление наночастиц, нанесенных на стеклянную подложку. Выполнены исследования зависимости плотности энергии лазерного импульса от его длительности в диапазоне 100–1000 фс. Анализ экспериментальных результатов показывает, что удаление наночастиц полностью определяется интенсивностью фемтосекундного лазерного импульса.

Все экспериментальные исследования были проведены с использованием разработанной в ОИВТ РАН комбинированной системы «фемтосекундный лазерный пинцет-скальпель» и оборудования, входящего в состав ЦКП «ЛФК» ОИВТ РАН.

Работа поддержана Российским научным фондом (проект № 14-19-01487).

1. Perrie W., Gill M., Robinson G., Fox P., O'Neill W. *Appl. Surf. Sci.*, **230**, 50 (2004).

2. Kuladeep R., Dar M.H., Deepak K.L.N., Rao D.N. *J. Appl. Phys.*, **116**, 113107 (2014).
3. Stratakis E., Zorba V., Barberoglou M., Fotakis C., Shafeev G.A. *Appl. Surf. Sci.*, **255**, 5346 (2009).
4. Katyal J., Soni R.K. *J. Mod. Opt.*, **60**, 1717 (2013).
5. Martin J., Plain J. *J. Phys. D: Appl. Phys.*, **48**, 184002 (2015).
6. Ekinci Y., Solak H., Löffler J. *J. Appl. Phys.*, **104**, 083107 (2008).
7. Chowdhury M.H., Ray K., Gray S.K., Pond J., Lakowicz J.R. *Anal. Chem.*, **81**, 1397 (2009).
8. Kabashin A.V., Evans P., Pastkovsky S., Hendren W., Wurtz G.A., Atkinson R., Pollard R.J., Podolskiy V.A., Zayats A.V. *Nat. Mater.*, **8**, 867 (2009).
9. Zhou X., Fang Y., Zhang P. *Spectrochim. Acta, Part A*, **67**, 122 (2007).
10. Tyagi H., Phelan P.E., Prasher R., Peck R., Lee T., Pacheco J.R., Arentzen P. *Nano Lett.*, **8**, 1410 (2008).
11. Galfetti L., De Luca L.T., Severini F., Meda L., Marra G., Marchetti M., Regi M., Bellucci S. *J. Phys.: Condens. Matter*, **18**, S1991 (2006).
12. Ghorbani H.R. *Orient. J. Chem.*, **30**, 1941 (2014).
13. Viau G., Colliere V., Lacroix L.-M., Shafeev G.A. *Chem. Phys. Lett.*, **501**, 419 (2011).
14. Kuzmin P.G., Shafeev G.A., Viau G., Warot-Fonrose B., Barberoglou M., Stratakis E., Fotakis C. *Appl. Surf. Sci.*, **258**, 9283 (2012).
15. Kumar B., Thareja R.K. *J. Appl. Phys.*, **108**, 064906 (2010).
16. Stratakis E., Zorba V., Barberoglou M., Fotakis C., Shafeev G.A. *Nanotechnology*, **20**, 105303 (2009).
17. Podagatlapalli G.K., Hamad S., Sreedhar S., Tewari S.P., Rao S.V., *Chem. Phys. Lett.*, **530**, 93 (2012).
18. Stratakis E., Barberoglou M., Fotakis C., Viau G., Garcia C., Shafeev G.A. *Opt. Express*, **17**, 12650 (2009).
19. Baladi A., Mamooory R.S. *Appl. Surf. Sci.*, **256**, 7559 (2010).
20. Kuladeep R., Jyothi L., Prakash P., Shekhar S.M., Prasad M.D., Rao D.N. *J. Appl. Phys.*, **114**, 243101 (2013).
21. Singh R., Soni R.K. *Appl. Phys. A*, **116**, 689 (2014).
22. Hornyak G.L., Phani K.L.N., Kunked D.L., Menon V.P., Martin C.R. *Nanostruct. Mater.*, **6**, 839 (1995).
23. Chefonov O.V., Sitnikov D.S., Ilina I.V., Kotelev M.S., Novikov A.A., Ovchinnikov A.V. *High Temp.*, **53**, 605 (2015).
24. Creighton J.A., Eadon D.G. *J. Chem. Soc., Faraday Trans.*, **87**, 3881 (1991).
25. Martin J., Proust J., Gerard D., Plain J. *Opt. Mater. Express*, **3**, 954 (2013).
26. Piriya Wong V., Thongpool V., Asanithi P., Limsuwan P. *J. Nanomater.* Doi:10.1155/2012/819403.
27. Pesiri D., Aumann C.E., Bilger L., Booth D., Carpenter R.D., Dye R., O'Neill E., Shelton D., Walter K.C. *J. Pyrotech.*, **19**, 19 (2004).
28. Агранат М.Б., Анисимов С.И., Ашитков С.И., Чефонов О.В., Овчинников А.В., Перельман Л.Т., Ситников Д.С., Юркевич А.А., Фортгов В.Е. *Письма в ЖЭТФ*, **101**, 671 (2015).
29. Sitnikov D.S., Yurkevich A.A., Kotelev M.S., Ziangirova M., Chefonov O.V., Ilina I.V., Vinokurov V.A., Muradov A.V., Itzkan I., Agranat M.B., Perelman L.T. *Laser Phys. Lett.*, **11**, 075902 (2014).
30. Boyd G.T., Yu Z.H., Shen Y.R. *Phys. Rev. B*, **33**, 7923 (1986).
31. Комаров Ф.Ф., Мудрый А.В., Власукова Л.А., Мухуров Н.И., Иванюкович А.В. *Оптика и спектроскопия*, **104**, 272 (2008).
32. Кортов В.С., Ермаков А.Е., Зацепин А.Ф., Уймин М.А., Никифоров С.В., Мысик А.А., Гавико В.С. *Физика твердого тела*, **50**, 916 (2008).
33. Sufeng Liu, Ligong Zhang, Yi Fan, Jinsong Luo. *App. Phys. Lett.*, **89**, 051911 (2006).