

МОДИФИКАЦИЯ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ПОВЕРХНОСТИ ПРИ ЛАЗЕРНО-ИНДУЦИРОВАННОМ КУЛОНОВСКОМ ВЗРЫВЕ НАНОЧАСТИЦ

© 2011 г. В. Е. Груздев*, канд. физ.-мат. наук; В. Л. Комолов**, канд. физ.-мат. наук;
С. Г. Пржибельский**, канд. физ.-мат. наук; Д. С. Смирнов**, канд. физ.-мат. наук;
Хао Ли*, канд. техн. наук

* Университет Миссури, г. Колумбия, США

** Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, Санкт-Петербург

E-mail: komolov@mail333.com

Представлены результаты изучения механизмов фемтосекундных лазерных взаимодействий с системой наночастиц, осажденных на твердой диэлектрической поверхности. Эксперименты показали, что в зависимости от уровня интенсивности осуществляются разные режимы взаимодействий лазерного излучения с наночастицами, включая частичное и полное удаление (абляцию) наночастиц и локальное повреждение самой поверхности. В режиме полной и частичной абляции наночастиц зарегистрированы следы внедрения ионов материала наночастиц в тонкий приповерхностный слой подложки. Моделирование разрушения наночастиц фемтосекундным лазерным импульсом подтверждает возможность испускания из них ионов с последующим внедрением в подложку.

Ключевые слова: лазерное воздействие, абляция, кулоновский взрыв.

Коды OCIS: 320.7130, 260.3230

Поступила в редакцию 14.02.2011

1. Введение

Фемтосекундные (ФС) лазеры нашли широкое применение для сверхточной микрообработки поверхности материалов благодаря уникальному свойству субпикосекундных импульсов вызывать абляцию среды в зоне воздействия практически без повреждения поверхности вокруг кратера [1–16]. Повышение точности микрообработки фемтосекундными лазерными импульсами закономерно привело к созданию структур (например, отверстий) с характерным размером несколько десятков нанометров при длине волны 800 нм. Эти результаты открывают уникальные возможности применения фемтосекундных лазеров в нанотехнологии для субволнового структурирования поверхности.

На пути успешного развития лазерных технологий нанобработки материалов стоит несколько препятствий, затрудняющих получение наноструктур. К ним относится, в частности, образование наночастиц при абляции под действием субпикосекундных лазерных импульсов. Размер таких частиц (10–50 нм)

сравним, а то и превышает размеры создаваемых лазерными импульсами наноструктур. Экспериментальные данные [17–26] и численное моделирование методом молекулярной динамики [27–30] указывают на то, что образование наночастиц в плазменном факеле при абляции твердых поверхностей является фундаментальным процессом, характерным именно для фемтосекундных лазерных импульсов ИК диапазона. Его физической причиной является возникновение сильно неравновесного состояния вещества при абляции из-за малой длительности воздействующих импульсов света. Продукты абляции могут осаждаться обратно на поверхность в виде изолированных наночастиц, аморфных конгломератов или сетевидных структур. Состав этих наночастиц и их структура зависят как от свойств материала мишени, так и от параметров лазерных импульсов.

Благодаря специфическим свойствам, наночастицы, сформированные при фемтосекундной лазерной абляции, перспективны для применений в медицине, а также в нано- и био-

технологиях. В последнее время проведено большое количество исследований по изучению процессов формирования и осаждения таких наночастиц при различных условиях. С точки зрения лазерных технологий нанопереработки, основанных на многоимпульсных лазерных воздействиях, формирование и осаждение наночастиц на аблируемую поверхность носит негативный характер. При таких воздействиях с исходной поверхностью взаимодействует только первый лазерный импульс, а все последующие воздействуют уже на систему наночастиц, осажденных на этой поверхности. Систематического изучения влияния этих наночастиц на результаты фемтосекундного лазерного воздействия на поверхность конденсированных сред до сих пор не проводилось. Данная работа является попыткой устранить этот пробел и изучить влияние наночастиц на взаимодействие излучения с поверхностью, а также выявить возможные механизмы модификации свойств поверхности в результате воздействия.

2. Экспериментальная установка и процедура измерений

Экспериментальная часть работы состояла в облучении поверхности с осажденными на ней наночастицами одиночными 130-фемтосекундными лазерными импульсами с длиной волны 775 нм (лазерная система CPA-2210, Clark-MXR, USA). Единственным варьируемым параметром лазерного излучения была энергия импульса. Спецификой данных экспериментов являлся большой диаметр лазерного пятна (0,5–2 мм), в пределах которого изменение интенсивности происходит достаточно плавно. Это позволяло осуществлять разные режимы взаимодействия лазерного импульса с системой наночастиц на поверхности в разных кольцевых зонах одного и того же пятна при воздействии всего одним фемтосекундным импульсом. Плотность энергии в лазерном пятне варьировалась от 0,2 до 3,5 Дж/см². Схема экспериментальной установки приведена на рис. 1.

Наночастицы, осажденные на поверхность, имеют различную структуру, состав и размеры. В эксперименте сложно контролировать эти параметры, что исключает возможность использования таких наночастиц для изучения механизмов взаимодействия с ними лазерного импульса и отклика поверхности на лазерное воздействие. Поэтому в эксперимен-

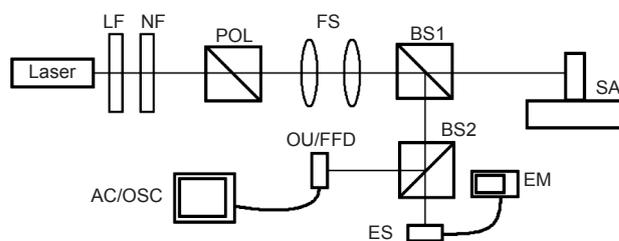


Рис. 1. Схема экспериментальной установки: Laser – фемтосекундный лазер, LF – низкочастотный фильтр, NF – нейтральный фильтр, POL – поляризатор Глана, FS – фокусирующая система (фокусное расстояние 200 мм), BS1 и BS2 – делители пучка (соотношение 1:10), ES – сенсор лазерного излучения, подключенный к измерителю энергии EM, OU/FFD – оптический блок автокоррелятора AC для контроля длительности импульсов или быстрый фотодиод для контроля контраста импульса, SA – образец на моторизованной подвижке.

тах использовали модельные ансамбли трех типов наночастиц строго контролируемого размера и состава, осажденных на поверхности пластинок из плавленого кварца:

1) диэлектрические наночастицы (SiO₂) со средним диаметром 170 нм, осажденные либо со средним интервалом 300–500 нм между ними, либо вплотную друг к другу (рис. 2а, б);

2) металлические (Au) частицы со средним диаметром 150 нм, осажденные либо со средним интервалом 300–500 нм между ними, либо вплотную друг к другу (рис. 2в, г);

3) диэлектрические наночастицы (SiO₂), осажденные с зазором 400 нм между ними и покрытые сверху 30-нанометровым слоем золота (рис. 2д, е).

Процедура измерений включала:

- исследование наночастиц с помощью оптического и электронного микроскопов (SEM) и измерение спектров отражения и пропускания до лазерного воздействия;

- лазерное воздействие, проводимое на воздухе при нормальных условиях в режиме один импульс на одну точку поверхности образца;

- исследование наночастиц с помощью оптического и электронного микроскопов и измерение спектров отражения и пропускания после лазерного воздействия;

- исследование методом рентгеновской фотоэлектронной спектроскопии состава при-

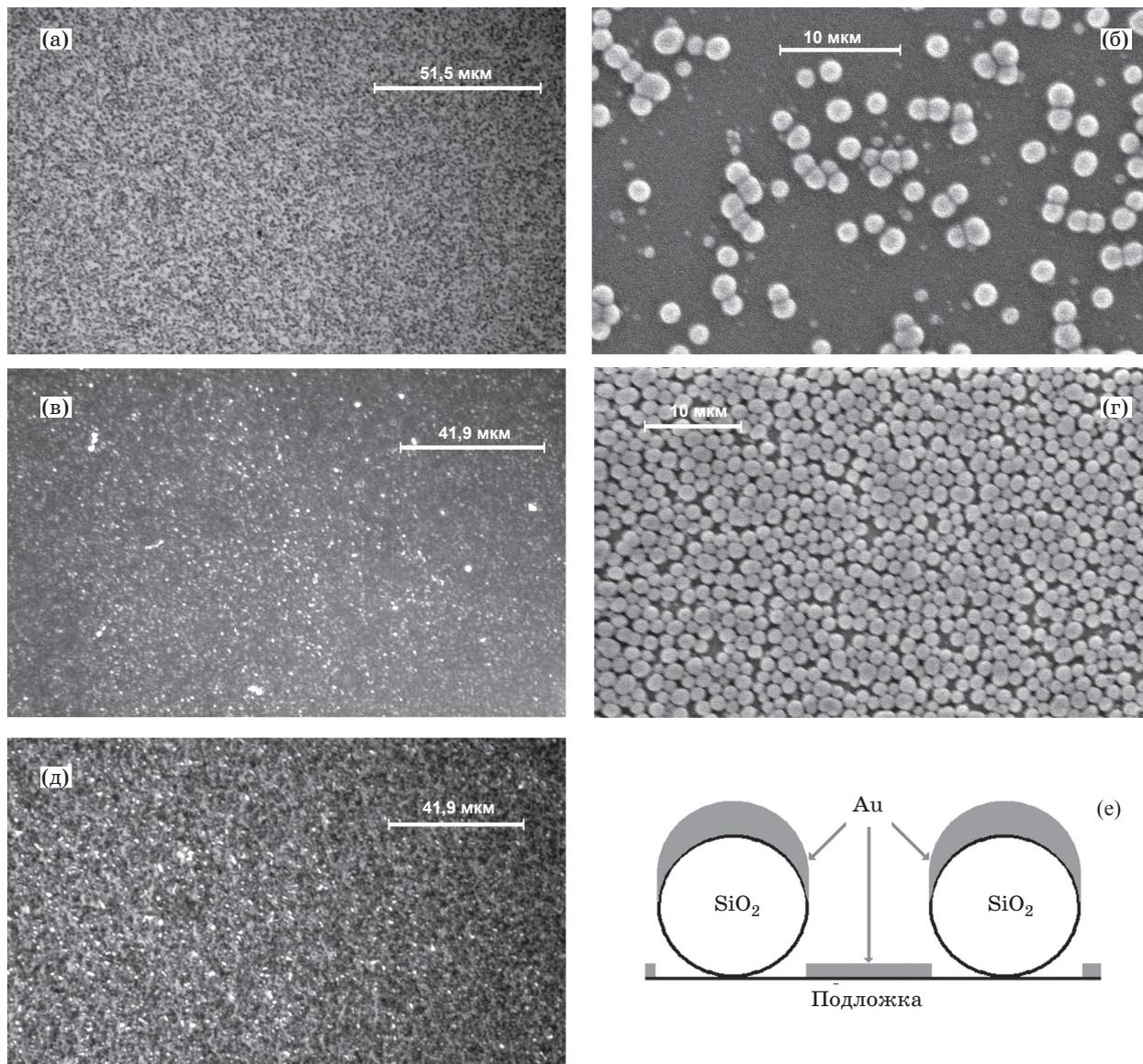


Рис. 2. Образцы наночастиц, использованные в экспериментах. а, в, д – изображения с оптического микроскопа, увеличение 1000 \times ; б и г – с электронного микроскопа. а и б – наночастицы SiO₂, нанесенные со средним интервалом 300 нм, в и г – наночастицы золота, расположенные вплотную, д – наночастицы SiO₂, покрытые слоем золота, е – схема покрытия частиц золотом.

поверхностного слоя подложки после удаления всех наночастиц с ее поверхности.

Для оптической спектроскопии использовали ртутно-водородный источник света со спектром излучения в диапазоне 300–2000 нм. Отраженный или прошедший через образец свет собирался интегрирующей сферой и направлялся на приемник трехканального широкополосного спектрометра (Avantes). Разрешение составляло 0,1 нм при времени интегрирования 10 с. Спектры отражения и пропускания чистой подложки использовались для коррекции результатов измерений.

3. Результаты экспериментов

В результате лазерного воздействия наблюдали изменения размеров, плотности, структуры и оптических спектров пропускания и отражения образцов наночастиц.

3.1. Спектры пропускания и отражения

Изменение оптических спектров после лазерного воздействия надежно наблюдали для всех образцов золотых наночастиц и наночастиц, покрытых слоем золота (рис. 3). Модификации

фикация оптических спектров состояла в следующем:

- слабое увеличение отраженного сигнала в видимой области;

- модификация тонкой структуры спектров в видимой и ближней инфракрасной областях спектра;

- уменьшение отраженного сигнала в инфракрасной области спектра.

Для диэлектрических наночастиц вариации спектров не удалось достоверно измерить при разумных временах интегрирования сигнала спектрометром.

3.2. Структура и плотность наночастиц

Изменения структуры и плотности наночастиц определяли с помощью оптического и электронного микроскопов. Оптическая микроскопия выявила наличие нескольких характерных зон лазерного воздействия в пределах пятна, которые были наиболее отчетливо видны для золотых наночастиц и диэлектрических частиц, покрытых слоем золота (рис. 4). Немодифицированные частицы наблюдались на периферии лазерного пятна. Электронная микроскопия показала, что наночастицы

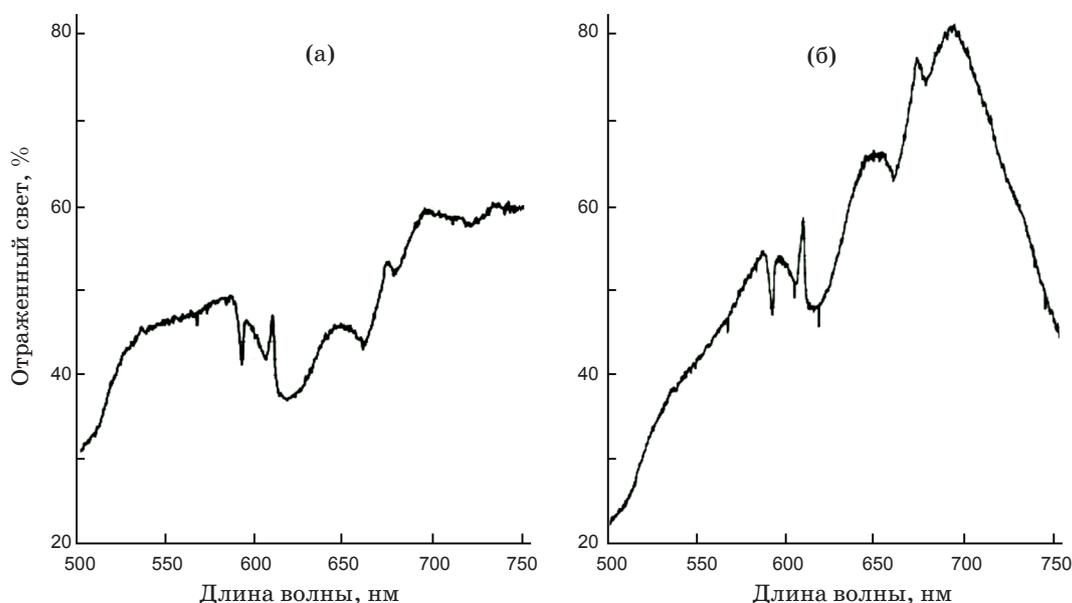


Рис. 3. Спектр отражения поверхности, покрытой наночастицами SiO_2 с золотым слоем до лазерного воздействия (а) и после него (б).

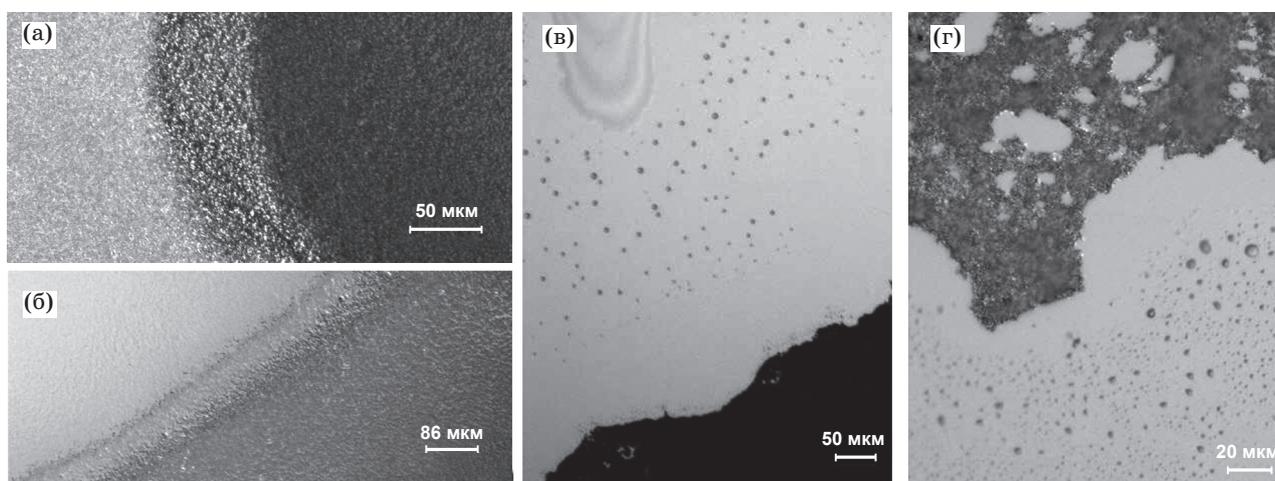


Рис. 4. Вид пятен лазерной абляции на образце с металлическими наночастицами, расположенными вплотную (б и в), и с наночастицами SiO_2 , покрытыми слоем золота (а и г), полученный оптическим микроскопом с увеличением 500 (а, в), 200 (б) и 1000 крат (г). Плотность энергии $0,84 \text{ Дж/см}^2$. Порог абляции чистой поверхности подложки $2,1 \text{ Дж/см}^2$.

этой зоны полностью идентичны исходным частицам.

Ближайшая к периферии зона была окрашена в темно-золотой или серый цвет (рис. 4а, б). В ее пределах размер металлических наночастиц был заметно меньше, чем у исходных, а с диэлектрических частиц было частично удалено золотое покрытие на их верхней части. Удаление наночастиц в этой зоне не наблюдалось. В пределах следующего кольца часть металлических наночастиц (самые маленькие) была удалена, а оставшиеся частицы (самые крупные до лазерного воздействия) имели сильно уменьшенные размеры. Изменение цвета этого кольца связано с заметным изменением плотности частиц. В случае диэлектрических наночастиц, покрытых слоем золота, это кольцо имело светло-серый цвет и соответствовало полному удалению золотого покрытия как с самих частиц, так и частичному удалению покрытия из зазоров между ними. Для металлических наночастиц далее следовала центральная часть пятна, в пределах которой все наночастицы были удалены лазерным излучением с формированием дефектов (микроратеров) микронного и субмикронного размеров (рис. 4в). В случае диэлектрических наночастиц, покрытых слоем золота, присутствовала еще одна зона взаимодействия, в пределах которой все покрытие было удалено, равно как и самые мелкие из наночастиц. Центральная часть пятна для частиц с покрытием имела вид, сходный со случаем металлических наночастиц – полное удаление всех частиц с формированием микронных и субмикронных кратеров (рис. 4г).

Для диэлектрических наночастиц наблюдалось только три зоны лазерного воздействия: зона исходных наночастиц, зона частично удаленных наночастиц и зона полностью удаленных наночастиц с формированием микроратеров в центре пятна.

Во всех случаях формирование микроратеров в центральной части лазерного пятна в результате полного удаления (абляции) всех наночастиц происходило при плотности энергии, заметно меньшей, чем порог абляции чистой поверхности. Измеренный порог абляции чистых подложек составлял $2,1 \text{ Дж/см}^2$, в то время как полное удаление наночастиц и формирование микроратеров наблюдалось при плотностях $0,5 \text{ Дж/см}^2$ для металлических и $1,5 \text{ Дж/см}^2$ для диэлектрических наночастиц.

3.3. Исследование состава приповерхностного слоя подложки

Состав подложек был исследован с помощью рентгеновской фотоэлектронной спектроскопии после полного удаления всех наночастиц с поверхности и травления поверхности в растворе HF заданной концентрации. Отсутствие наночастиц контролировали с помощью электронного микроскопа. Фотоэлектронная спектроскопия выполнялась с помощью монохроматического источника (K α , полоса алюминия, 1486,6 эВ) при давлении 3×10^{-10} Торр. Для всех образцов с золотыми наночастицами и золотым покрытием на диэлектрических наночастицах сначала проводилось сканирование в широком диапазоне (117–1200 эВ с шагом 1 эВ) для выявления присутствующих в материале элементов, а затем выполнялось более детальное сканирование вблизи характерных пиков с шагом 0,05 эВ. Результаты показали наличие следов золота на глубине до 150–250 нм под поверхностью подложки.

4. Моделирование фемтосекундного лазерного воздействия на наночастицу на подложке

Мы предполагаем, что при воздействии фемтосекундного лазерного импульса на наночастицу осуществляется следующая последовательность процессов:

- фотоэмиссия электронов из наночастицы, приводящая к возникновению в ней нескомпенсированного положительного заряда;
- движение ионного остова наночастицы в возникающем самосогласованном электростатическом поле, приводящее к вылету части образовавшихся ионов за ее пределы (“кулоновский взрыв”);
- проникновение части разлетающихся ионов в подложку и модификация свойств материала подложки без ее разрушения на масштабах, сравнимых с начальными размерами частицы.

Особенно ярко механизм “наноимплантации” должен проявляться при воздействии ультракороткого импульса (УКИ), когда за время импульса не успевают начаться процессы разогрева среды, маскирующие действие “кулоновского взрыва” наночастицы. Кроме того, при воздействии УКИ процессы образования заряженной области и разлет ионов из наночастицы разделены во времени (фотоионизация

происходит за время импульса, в то время как движение тяжелых ионов начинается после его окончания). Это упрощает проводимый анализ, позволяя разделить его на две последовательные стадии:

- создание источника ионов (в течение импульса);
- ионное легирование подложки (после окончания импульса).

Ранее [31–33] нами был предложен простой метод анализа деструкции изолированной наночастицы при ее фотоионизации. Было показано, что поле нескомпенсированного электрического заряда, возникающего при фотоионизации наночастицы, способно вызвать движение образующихся ионов и “разогнать” их до энергий порядка кэВ. В данной работе этот метод применен к анализу системы “наночастица–подложка”.

Предполагается, что эмиссия электронов за время действия лазерного импульса приводит к формированию положительного заряда на частице. Возникающие кулоновские силы вызывают движение ионов в самосогласованном электростатическом поле. Потери энергии ионов определяются неупругими столкновениями заряженных и нейтральных узлов решетки. В рамках используемого приближения взаимодействие между ионами рассчитывается точно, а взаимодействие ионов с нейтральными частицами – приближенно, с использованием двух свободных параметров – длины свободного пробега иона до столкновения и доли энергии, которую ион теряет при столкновении. По существу, это численный вариант учета вязкого трения, используемого для анализа движения частицы в непрерывной среде.

Основные черты предлагаемой нами модели таковы:

- первоначально заряженные частицы распределены в пространстве случайным образом;
- на каждом шаге расчет параметров движения (положение, скорость и ускорение) проводится для каждой частицы с учетом действия кулоновских сил всех других частиц ансамбля;
- столкновения заряженных частиц с нейтральными учитываются введением средней длины свободного пробега ионов до соударения. Еще одним свободным параметром задачи, используемым в модели, является доля энергии, которая теряется при столкновении и которая может меняться в диапазоне от нуля (упругое рассеяние) до 100%;

– предполагается, что движение иона прекращается, если полный кулоновский потенциал в точке расположения иона становится меньше, чем энергия активации миграции точечных дефектов.

На рис. 5, 6 приведены временные зависимости движения ионов как внутри наночасти-

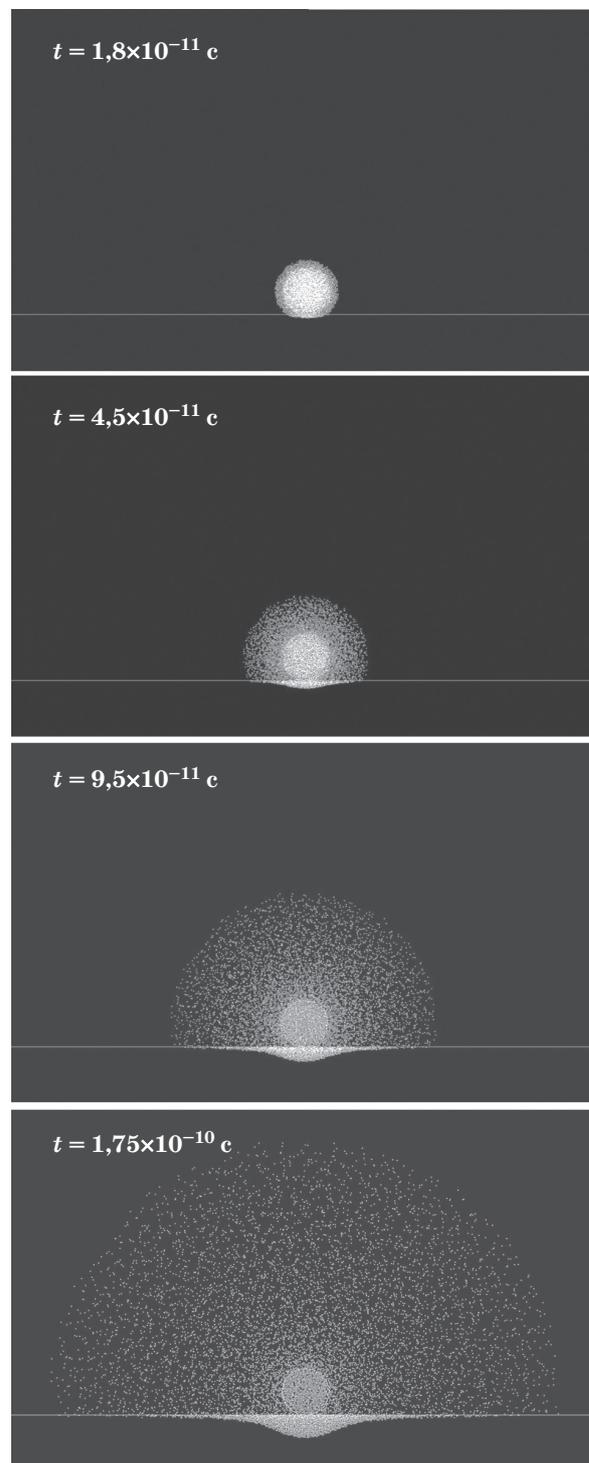


Рис. 5. Кадры, иллюстрирующие процесс разлета ионов из сферической наночастицы, находящейся на подложке.

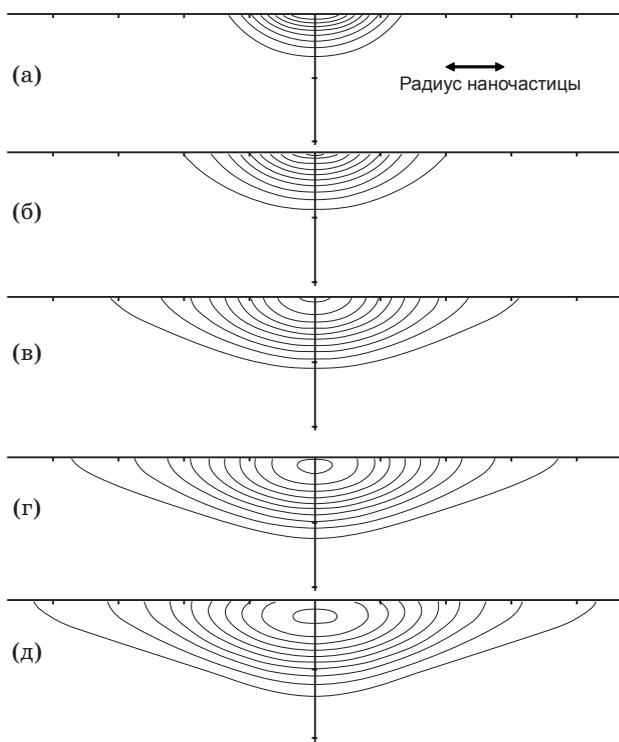


Рис. 6. Примеры пространственных профилей концентрации ионов $N(r, z)$ под поверхностью подложки в различные моменты времени: $t = 1,8 \times 10^{-11}$ с (а); $t = 4,5 \times 10^{-11}$ с (б); $t = 9,5 \times 10^{-11}$ с (в); $t = 1,3 \times 10^{-10}$ с (г); $t = 1,75 \times 10^{-10}$ с (д). Шаг по концентрации между соседними линиями составляет 10%.

цы, так и за ее пределами, и пространственные профили концентрации ионов, которые проникают в приповерхностный слой подложки. При оценках использовался следующий набор параметров:

- радиус частицы – 75 нм,
- начальное среднее расстояние между ионами – 5 нм, что соответствует степени ионизации $\sim 10^{-3} - 10^{-4}$,
- масса ионов – $3,2 \times 10^{-28}$ г,
- длина свободного пробега ионов до столкновения – 1 нм,
- часть энергии, которую ион теряет при столкновении – 50%,
- энергия активации миграции точечных дефектов – 1 эВ.

Таким образом, оценки показывают, что даже при сравнительно небольшой начальной степени ионизации наночастиц (при умеренных уровнях интенсивности света) достаточное количество ионов может проникнуть внутрь приповерхностного слоя подложки на глубину, сравнимую с размером наночастиц.

Характерной особенностью пространственного распределения внедренных в подложку ионов является то, что максимум их концентрации лежит под поверхностью на расстоянии, сравнимом с размерами наночастицы.

Физическая природа немонотонности профиля концентрации очевидна: постоянный источник индуцированного электростатического поля внутри ионизированной наночастицы продолжает ускорять ионы даже под поверхностью подложки. В результате движение ионов продолжается до тех пор, пока кулоновский потенциал в точке расположения иона не станет меньше, чем энергия активации миграции ионов в твердом теле.

Мы обсуждаем эту особенность проникновения ионов в подложку столь подробно, потому что она дает возможность прямой экспериментальной проверки механизма разрушения наночастиц, сопровождающегося внедрением ионов в подложку путем измерения плотности распределения примеси поперек приповерхностного слоя после облучения.

5. Обсуждение и выводы

Результаты экспериментов указывают на то, что присутствие наночастиц на поверхности диэлектрика существенно влияет на ее взаимодействие с лазерным излучением большой мощности. В частности, наночастицы инициируют абляцию поверхности с формированием микрократеров при плотности энергии, существенно меньшей порога абляции чистой поверхности. Это влияние наблюдалось как в случае металлических, так и в случае диэлектрических наночастиц. Одним из наиболее вероятных механизмов такого локального снижения порога абляции является перераспределение интенсивности лазерного излучения с формированием максимумов, локализованных на наночастицах. В случае металлических частиц максимумы могут возникать за счет возбуждения плазмон-поляритонных мод [34–38].

Важным результатом исследований является обнаружение специфического механизма модификации поверхности подложки при удалении с нее наночастиц фемтосекундным импульсом – внедрение ионов, испускаемых частицами при разрушении. Хотя экспериментально зарегистрированный с помощью рентгеновской фотоэлектронной спектроскопии сигнал ионов золота был мал и слабо выделялся на фоне шумов, но в пользу присутствия такого

эффекта говорят результаты численного моделирования деструкции ионизированной наночастицы. Они показывают, что ионы, возникающие в частице под действием ультракороткого импульса света, могут проникать в приповерхностный слой диэлектрической подложки на глубину, сравнимую с размером наночастиц, и вызывать серьезные изменения ее структуры и свойств. Снижение порога абляции и формирования микрократеров, связанные с генерацией дефектов в приповерхностном слое подложки при внедрении в нее ионов, выпуска-

емых частицами, никак не коррелирует с порогом разрушения поверхности при воздействии одиночным фемтосекундным импульсом, поскольку поток ионов устанавливается с существенной задержкой после окончания действия лазерного импульса, когда изменение свойств поверхности уже не влияет на процессы абляции.

Авторы благодарят Кс. Сана (университет Миссури) за помощь в изготовлении образцов наночастиц и проведение измерений на электронном микроскопе.

* * * * *

ЛИТЕРАТУРА

1. Perry M.D., Stuart B.C., Banks P.S., Fei, M.D., Yanovsky V., Rubenchik A.M. Ultrashort-pulse laser machining of dielectric materials // *J. Appl. Phys.* 1999. V. 85(9). P. 6803–6810.
2. Kamlage G., Bauer T., Ostendorf A., Chichkov B. N. Deep drilling of metals by femtosecond laser pulses // *Appl. Phys. A.* 2003. V. 77. P. 307–310.
3. Sugioka K., Cheng Y., Midorikawa K. Three-dimensional micromachining of glass using femtosecond laser for lab-on-chip device manufacture // *Appl. Phys. A.* 2005. V. 81. P. 1–10.
4. Misawa H., Juodkazis S. 3D Laser Microfabrication. Principles and Applications // Wiley-VCH Verlag GmbH. Weinheim. 2006. P. 239–384.
5. Sanz M., Castillejo M., Amoroso S., Ausanio G., Bruzzese R., Wang X. Ultra-fast laser ablation and deposition of TiO₂ // *Appl. Phys. A.* 2010. to appear.
6. Shin J., Jang K., Lim K.-S., Kim Y.-S., Lee Y.-L., Choi J.-H., Sohn I.-B., Lee J., Lee M. Formation and removal of multi-layered fluorescence patterns in gold-ion doped glass // *Appl. Surf. Sci.* 2009. V. 255. P. 9754–9757.
7. Nishiyama H., Nishii J., Mizoshiri M., Hirata Y. Microlens arrays of high-refractive-index glass fabricated by femtosecond laser lithography // *Appl. Surf. Sci.* 2009. V. 255. P. 9750–9753.
8. Nakashima S., Sugioka K., Midorikawa K. Fabrication of microchannels in single-crystal GaN by wet-chemical-assisted femtosecond-laser ablation // *Appl. Surf. Sci.* 2009. V. 255. P. 9770–9774.
9. Wang X., Chen F., Yang Q., Liu H., Bian H., Si J., Hou X. Fabrication of quasi-periodic micro-voids in fused silica by single femtosecond laser pulses // *Appl. Phys. A.* 2010. V. 92. P. 1–6.
10. von der Linde D., Sokolowski-Tinten K. The physical mechanisms of short-pulse laser ablation // *Appl. Surf. Sci.* 2000. V. 154–155. P. 1–10.
11. Schaffer C., Brodeur A., Mazur E. Laser-induced breakdown and damage in bulk transparent materials induced by tightly focused femtosecond laser pulses // *Meas. Sci. Technol.* 2001. V. 12. P. 1784–1794.
12. Juodkazis S., Mizeikis V., Matsuo S., Ueno K., Misawa H. Three-dimensional micro- and nano-structuring of materials by tightly focused laser radiation // *Bull. Chem. Soc. Jpn.* 2008. V. 81(4). P. 411–448.
13. Phipps C.R. Laser Ablation and its Applications: Springer Series in Optical Sciences. V. 129. Springer, New York. 2007. P. 99–121.
14. Koch J., Korte F., Bauer T., Fallnich C., Ostendorf A., Chichkov B. N. Nanotexturing of gold films by femtosecond laser-induced melt dynamics // *Appl. Phys. A.* 2005. V. 81. P. 325–328.
15. White Y. V., Li X., Sikorski Z., Davis L. M., Hofmeister W. Single-pulse ultrafast-laser machining of high aspect nano-holes at the surface of SiO₂ // *Opt. Express.* 2008. V. 16(19). P. 14411–14420.
16. Békési J., Klein-Wiele J.-H., Simon P. Efficient submicron processing of metals with femtosecond UV pulses // *Appl. Phys. A.* 2003. V. 76. P. 355–357.
17. Amoroso S., Bruzzese R., Spinelli N., Velotta R., Vitiello M., Wang X. Formation of nanoparticles during ultrashort laser irradiation of silicon targets // *Europhys. Lett.* 2004. V. 67 (3). P. 404–410.
18. Amoroso S., Ausanio G., Bruzzese R., Vitiello M., Wang X. Femtosecond laser pulse irradiation of solid targets as a general route to nanoparticle formation in vacuum // *Phys. Rev. B.* 2005. V. 71. P. 033406.

19. *Amoruso S., Ausanio G., Barone A.C., Bruzzese R., Gragnaniello L., Vitiello M., Wang X.* Ultrashort laser ablation of solid matter in vacuum: a comparison between the picosecond and femtosecond regimes // *J. Phys. B: At. Mol. Opt. Phys.* 2005. V. 38. L329–L338.
20. *Tull B.R., Carey J.E., Sheehy M.A., Friend C. Mazur E.* Formation of silicon nanoparticles and web-like aggregates by femtosecond laser ablation in a background gas // *Appl. Phys. A.* 2006. V. 83. P. 341–346.
21. *Amoruso S., Bruzzese R., Pagano C., Wang X.* Features of plasma plume evolution and material removal efficiency during femtosecond laser ablation of nickel in high vacuum // *Appl. Phys. A.* 2007. V. 89. P. 1017–1024.
22. *Perriere J., Boulmer-Leborgne C., Benzerga R., Tricot S.* Nanoparticle formation by femtosecond laser ablation // *J. Phys.D: Appl. Phys.* 2007. V. 40. P. 7069–7076.
23. *Guillermin M., Colombier J.P., Valette S., Audouard E., Garrelie F., Sroian R.* Optical emission and nanoparticle generation in Al plasmas using ultrashort laser pulses temporally optimized by real-time spectroscopic feedback // *Phys. Rev. B.* 2010. V. 82. P. 035430.
24. *Švrček V., Kondo M.* Blue luminescent silicon nanocrystals prepared by short pulsed laser ablation in liquid media // *Appl. Surf. Sci.* 2009. V. 255. P. 9643–9646.
25. *Ganeev R.A., Boltaev G.S., Tugushev R.I., Usmanov T.* Nanoparticle formation during laser ablation of metals at different pressures of surrounding noble gases // *Appl. Phys. A.* 2010. V. 100. P. 119–123.
26. *Lescoute E., Hallo L., Hebert D., Chimier B., Etchessahar B., Tikhonchuk V.T., Chevalier J. M., Combis P.* Experimental observations and modeling of nanoparticle formation in laser-produced expanding plasma // *Phys. Plasma.* 2008. V. 15. P. 063507.
27. *Lorazo P., Lewis L.J., Meunier M.* Thermodynamic pathways to melting, ablation, and solidification in absorbing solids under pulsed laser irradiation // *Phys. Rev. B.* 2006. V. 73. P. 134108.
28. *Itina T., Gouriet K., Zhigilei L., Neol S., Hermann J., Sentis M.* Mechanisms of small clusters production by short and ultra-short laser ablation // *Appl. Surf. Sci.* 2007. V. 253. P. 7656–7661.
29. *Glover T.E.* Hydrodynamics of particle formation following femtosecond laser ablation // *J. Opt. Soc. Am. B.* 2003. V. 20(1). P. 125–131.
30. *Chimier B., Tikhonchuk V.T.* Liquid-vapor phase transition and droplet formation by subpicosecond laser heating // *Phys. Rev. B.* 2009. V. 79. 184107.
31. *Gruzdev V.E., Komolov V.L., Przhibel'skii S.G., Smirnov D.S.* Dynamics of spreading of a spherical particle ionized by intense ultra-short laser pulse // *Proc. SPIE.* 2006. V. 6256. P. 30–39.
32. *Gruzdev V.E., Komolov V.L., Przhibel'skii S.G., Smirnov D.S.* Destruction of the nano-size solid particles under femtosecond laser pulse action // *Proc. SPIE.* 2007. V. 6596. P. 65960P-1–65960P-8.
33. *Груздев В.Е., Комолов В.Л., Пржибельский С.Г., Смирнов Д.С.* Деструкция наночастицы, частично ионизованной мощным ультракоротким лазерным импульсом // *Оптический журнал.* 2007. Т. 74. № 6. С. 3–9.
34. *Huang W.* Fundamental studies of the interaction between femtosecond laser and patterned monolayer plasmonic nanostructures. Ph. D. theses presented at School of Chemistry and Biochemistry. 2007. Georgia Institute of Technology: Atlanta. Georgia. 271 p.
35. *Link S. El-Sayed M.A.* Optical properties and ultrafast dynamics of metallic nanocrystals // *Annual Review of Physical Chemistry.* 2003. V. 54. P. 331–366.
36. *Stepanov A.L.* Modification of implanted metal nanoparticles in the dielectrics by high-power laser pulses // *Reviews on Advanced Materials Science.* 2003. V. 4(2). P. 123–138.
37. *Link S. El-Sayed M.A.* Size and Temperature Dependence of the Plasmon Absorption of Colloidal Gold Nanoparticles // *J. Phys. Chem. B.* 1999. V. 103(21). P. 4212–4217.
38. *Kreibig U., Vollmer M.* Optical Properties of Metal Clusters. Springer, Berlin, 1995. 532 p.