Письма в ЖЭТФ, том 104, вып. 11, с. 780 – 786 © 2016 г. 10 декабря

Перераспределение материала при фемтосекундной лазерной абляции тонкой серебряной пленки[1)]

П. А. Данилов[a 2)], Д. А. Заярный[a], А. А. Ионин[a], С. И. Кудряшов[a,b,c 2)], А. А. Руденко[a], А. А. Кучмижак[c,d], О. Б. Витрик[c,d], Ю. Н. Кульчин[c], В. В. Жаховский[e,f], Н. А. Иногамов[e,f 2)]

[a] Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН, 119991 Москва, Россия

[b] Национальный исследовательский ядерный университет МИФИ, 115409 Москва, Россия

[c] Институт автоматики и процессов управления ДВО РАН, 690041 Владивосток, Россия

[d] Дальневосточный федеральный университет, 690041 Владивосток, Россия

[e] Всероссийский НИИ автоматики им. Н.Л. Духова Росатом, 127055 Москва, Россия

[f] Институт теоретической физики им. Л.Д. Ландау РАН, 142432 Черноголовка, Россия

Поступила в редакцию 7 сентября 2016 г.

После переработки 12 октября 2016 г.

Метод энергодисперсионной рентгеновской микроспектроскопии впервые использован для количественного изучения пространственного перемещения материала серебряной пленки толщиной 100 нм под действием одиночного фемтосекундного лазерного импульса, сфокусированного в малое пятно на дифракционном пределе. Для полученных радиально-симметричных субмикронных структур – микроконуса с наномасштабным острием различной длины и сквозного отверстия – определены распределения массы серебра по радиальным сечениям и проанализирован баланс вещества. Исследованы гидродинамические процессы и фазовые переходы, вызывающие плавление пленки, движение расплава и его рекристаллизацию в пределах фокального пятна.

DOI: 10.7868/S0370274X16230041

1. Введение. Кроме лазерной абляции (т.е. удаления материала), при воздействии остросфокусированным пучком имеют место индуцированные лазерным воздействием гидродинамические течения расплава, которые приводят к перераспределению вещества на мишени. Позже перемещенный жидкий металл рекристаллизуется в форме радиально-симметричных нано- и субмикромасштабных структур: конусов [1] (в том числе с наноострием на вершине [1–6]), корон [1, 6–10], и отверстий [6, 11–14]. Нано- и субмикрометровые пространственные и субнаносекундные временные [6, 12–14] масштабы области течения пока не позволяют осуществить полную динамическую визуализацию локальных потоков[3)]. Поэтому в качестве косвенных визуальных индикаторов направлений и интенсивности имевших место перемещений жидкой фазы выступают затвердевшие нано- и субмикроструктуры [1–4, 7–14], исследуемые с помощью сканирующей (СЭМ) или просвечивающей электронной микроскопии.

Теоретические методики описания наноструктур опираются на двухтемпературное гидродинамическое моделирование и молекулярную динамику [4–6, 19]. Разрез рекристаллизационных радиально-симметричных структур фокусированным ионным пучком после напыления защитного слоя позволяет, даже при практически непроверяемом условии соответствующей минимальной пост-модификации, получить лишь качественную или полуколичествен-

[1)] См. дополнительные материалы к данной статье на сайте нашего журнала www.jetpletters.ac.ru.

[2)] e-mail: Pavel-Danilov2009@yandex.ru, sikudr@lebedev.ru, nailinogamov@gmail.com

[3)] Имеются pump-probe методики, покрывающие диапазон времен развития процесса от долей пикосекунды до наносекунд [15–17]. Но они применяются к ситуациям с гораздо большими размерами пятен нагрева (десятки микрометров). При этом используются фемтосекундный (фс) pump и фс probe импульсы. Выполнены pump-probe измерения финальных стадий формирования и распада струи на капли (или затвердевания струи без распада при меньшей поглощенной энергии) [18]; фс pump и 9 нс probe. Измерения [18] относятся к временам от 5 до 500 нс и размерам пятен с диаметрами в несколько мкм. Количественные характеристики перемещения вещества во время образования параболического или конусообразного купола и зарождения струи оставались не измеренными экспериментально.

ную информацию о трехмерном распределении массы вещества по его двухмерному радиальному сечению [20].

В настоящей работе впервые сообщаются результаты количественного энергодисперсионного рентгено-флуоресцентного спектрального анализа двумерного распределения массы (толщины) серебра в субмикронной области одноимпульсной лазерной модификации пленки серебра.

Результаты опытов сопоставляются с приведенными в работе данными численного моделирования. Согласие опытов и расчетов в отношении морфологии структур и изменения форм при нарастании вложенной энергии, с одной стороны, подкрепляет выводы эксперимента, а, с другой, указывает на правильность приближений, заложенных в физическую модель. Преимуществом численного моделирования является то, что оно позволяет наглядно показать, как именно протекают сложные динамические процессы.

2. Эксперимент. В наших исследованиях лазерное облучение свежих участков образцов осуществлялось на стенде для нано- и микроструктурирования [1] с использованием одиночных фемтосекундных импульсов второй гармоники волоконной лазерной установки с активной средой, легированной ионами иттербия: длина волны второй гармоники – 515 нм, длительность на полувысоте – 200 фс, максимальная энергия в импульсе – 4 мкДж в TEM_{00}-моде, частота следования импульсов – $0 \div 2$ МГц. Лазерное излучение через делительное зеркало с пропусканием 50 % фокусировалось на поверхность образца в воздухе через объектив микроскопа с числовой апертурой $NA = 0.25$ в пятно радиусом $R_{1/e} = 2.2 \pm 0.1$ мкм. Образцы размещались на трехкоординатной моторизированной трансляционной платформе с минимальным шагом 150 нм и перемещались от импульса к импульсу.

Визуализация рельефа облученной поверхности проводилась при помощи сканирующего электронного микроскопа (СЭМ) JEOL 7001F. В качестве образцов использовались свежие пленки серебра Ag толщиной 100 ± 10 нм, напыленные в атмосфере аргона на поверхности стеклянных (K-8) подложек путем магнетронного распыления (SC7620, Quorum Technologies) фольги, полученной из слитка серебра (чистота 99.99 %, Сбербанк РФ). Химический анализ лазерно-модифицированных пленок был проведен методом микроспектроскопии характеристической энергодисперсионной рентгеновской флуоресценции (ЭДРС) с помощью спектрометра INCA Energy 350XT (Oxford Instruments Analytical) при энергии электронов 30 кэВ (характерная глубина проникновения в серебре 1.44 мкм). Определялись интенсивности линий характеристического рентгеновского L-излучения серебра с энергией 3.0 кэВ и K-излучения кремния с энергией 1.7 кэВ.

Данный метод в режиме сканирования позволил впервые исследовать пространственные профили ЭДРС-сигналов по элементам Ag (пленка) и Si (подложка) в области одноимпульсной лазерной модификации. Методика обладает весьма высоким (Δx меньше диаметра струи!) пространственным разрешением $\Delta x \approx 10$ нм/пиксель в плоскости подложки. При сканировании накапливалось до 50 отсчетов/пиксель для аккуратного определения радиального распределения массовой толщины M. Участок лазерной модификации пленки сравнивался с немодифицированной пленкой. С учетом относительно высокой энергии электронов, ток в луче выбирался на низком уровне (79 пА) для минимизации теплового повреждения нано- и микроструктуры пленки под действием электронного луча (рис. 1).

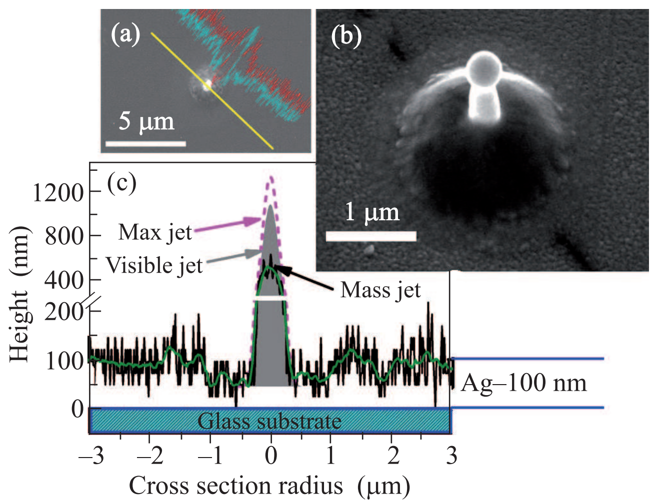

Рис. 1. (Цветной онлайн) (a) – СЭМ-изображение структуры (вид сверху), сформированной единичным импульсом 0.37 Дж/см^2. На СЭМ-изображение наложены ненормированные ЭДРС-профили Ag (голубая кривая) и Si (красная кривая) вдоль желтого радиуса сканирования. (b) – СЭМ-изображение той же структуры под углом обзора 30° после ЭДРС-анализа. Здесь темная косая линия – ожог поверхности по линии сканирования в ходе ЭДРС-анализа. (c) – Нормированный радиальный профиль толщины слоя серебра по сечению этой структуры (mass jet, черная кривая). Штриховая кривая (max jet) показывает максимально возможную высоту струи при ее видимой остаточной толщине у основания и отсутствии вылета капель. Профиль серого цвета дает видимый размер струи по СЭМ-изображению (visible jet)

3. Результаты. Одноимпульсное лазерное воздействие на поверхность пленки при малой пиковой плотности энергии в центре фокального пятна $F = 0.37$ Дж/см^2 приводит к появлению небольшого микроконуса с маленьким зародышем наноострия на вершине (рис. 1a, b). На периферии области воздействия (т.е. при существенно меньшей плотности энергии, чем 0.37 Дж/см^2) происходит отжиг (т.е. без плавления) или даже перекристаллизация (т.е. плавление имело место) нанозернистой структуры пленки. ЭДРС-анализ вдоль радиального сечения данной структуры показывает симметричное распределение элементов Ag и Si относительно центра (рис. 1a). При этом в области микроконуса сигнал рентгеновской флуоресценции, отвечающий содержанию серебра на глубине проникновения электронного пучка, падает, а соответствующий сигнал кремния резко возрастает (рис. 1a). Напротив, в области центрального острия (замороженной восходящей струи) сигнал рентгеновской флуоресценции серебра возрастет значительно выше уровня, отвечающего периферической немодифицированной пленке, а сигнал кремния резко уменьшается.

ЭДРС-сигнал серебра калибруется по уровню сигнала для немодифицированной пленки. Глубина проникновения электронов с энергией 30 кэВ равна $\delta \approx 1.44$ мкм. Распределение массы в области лазерного пятна является примерно аксиально-симметричным. Речь идет о количестве массы серебра $M(x, y) = M(r) = \rho H$ [г/см^2] на луче электронного пучка, т.е. на нормали (луч падает по нормали) к плоскости мишени $z = 0$, в расчете на единицу площади на плоскости мишени, здесь x, y – координаты в плоскости мишени, $r = \sqrt{x^2 + y^2}$, H – протяженность слоя серебра вдоль нормали к плоскости $z = 0$. Пример профиля вдоль проходящей через центр прямой сканирования (желтая прямая) приведен на рис. 1a, c. Видим, что в области острия (струи) величина M возрастает более чем в пять раз, а в области купола уменьшается в три раза. Следовательно, лазерное воздействие приводит к сильному перераспределению массы.

Имеется слабовыраженный бортик на периферии купола; см. объяснение по поводу появления бортика в дополнительном материале. Рис. 1 соответствует случаю вблизи порога отрыва первой капли. Из расчетов (см. п. 4 ниже) следует, что если замерзшая струя увенчана крупной каплей, то, скорее всего, отрыва капель не было. Разница между струями "max jet" и "visible jet" на рис. 1, видимо, связана с погрешностью определения "max jet", из баланса массы. При температурах и на временах остывания расплава испарением можно пренебречь. То, что "mass jet" меньше, чем "visible jet" связано с необходимостью коррекции в будущем данных ЭДРС для учета факторов: 1) поглощение электронов в толще струи (высота струи сравнима с $\delta = 1.44$ мкм), и 2) ослабление выходящего назад характеристического рентгеновского L-излучения.

При увеличении пиковой плотности энергии до $F \approx 0.53$ Дж/см^2 центральное острие (струя) на вершине конуса получается более высоким (ср. рис. 1 и 2a, см. также рис. 4b1, b2 ниже). При этом купол становится более тонким (темным) и гофрированным. Эти визуальные детали СЭМ-изображений отчетливо проявляются в профилях массовой толщины (рис. 2a, c). Имеет место почти двукратное утончение струи у основания при сохранении высоты струи почти в две начальные толщины пленки (рис. 2c). Тогда как толщина купола уменьшается почти в десять раз по сравнению с начальной. Бортик по периферии купола при травлении пленки ионным пучком сохраняется в виде кольца [21]. Согласно рис. 2c, бортик имеет ширину на полувысоте 100 нм и высоту не более 20–25 нм. Большая разница между профилями струи "max jet" и "visible jet" на рис. 2c указывает на существенный вынос массы через восходящую струю в виде отдельных вылетающих капель. Динамика распада струи на капли для случая на рис. 2 и

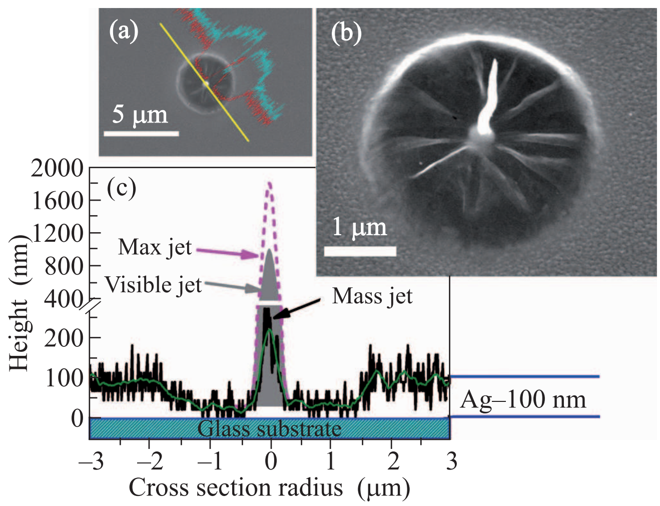

Рис. 2. (Цветной онлайн) (a) – СЭМ-изображение структуры (вид сверху) при 0.53 Дж/см^2. Показаны ненормированные ЭДРС-профили Ag и Si. (b) – СЭМ-изображение той же структуры под углом обзора 30° до ЭДРС-анализа. (c) – Показаны 1) нормированный радиальный профиль толщины слоя серебра по сечению этой структуры и 2) профили струи с обозначениями как на рис. 1

4b1, b2 показана в видеоролике 225 в дополнительном материале.

При высокой пиковой плотности энергии 1.05 Дж/см^2 (рис. 3) происходит полное удаление

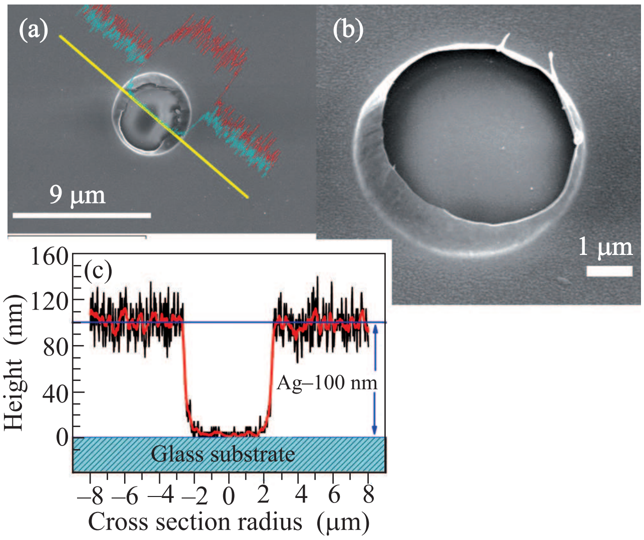

Рис. 3. (Цветной онлайн) (a) – СЭМ-изображение структуры (вид сверху) с желтой прямой и цветными – красной и голубой — кривыми, показывающими направление сечения и соответствующие ненормированные профили ЭДРС-сигнала для кремния и серебра, 1.05 Дж/см^2. (b) – СЭМ-изображение до ЭДРС-анализа (вид под углом обзора 30°). (c) – Нормированный радиальный профиль M для серебра

серебра в пределах отверстия. Этот случай соответствует рис. 4c1, c2, приведенному ниже. Чтобы понять динамику формирования струи, ее отрыва и распада купола на капли следует посмотреть видеоролик 226 в дополнительном материале.

4. Моделирование. Для описания процессов, инициированных лазером, создана физическая модель и выполнены расчеты. Прямое молекулярно-динамическое (МД) моделирование опытов, представленных на рис. 1–3, лежит за пределами современных компьютерных возможностей. Действительно, в пятне объемом $V = \pi R_{1/e}^2 h = 1.5$ мкм^3 находится $nV = 10^{11}$ атомов серебра, где $n \approx \approx 60$ атомов/нм^3 – концентрация атомов. За время сепарации от подложки ($t_{sep} \approx t_s = h/c_s \approx 30$ пс) пленка механически взаимодействует с примерно таким же объемом стекла, здесь c_s – скорость звука. Современные рекордные МД-расчеты охватывают порядка $(1 \div 10) \cdot 10^9$ атомов. В обычных расчетах оперируют с $(5 \div 50) \cdot 10^6$ атомов. Кроме того, расчет получается очень продолжительным, до $10 \div 100$ нс. Соответственно число шагов по времени доходит до 10^8, поскольку МД-шаг по времени ~ 1 фс. Однако, нам удалось найти обходные пути, чтобы преодолеть трудности, связанные с ограниченностью численных ресурсов. Перед тем, как описать разработанные приемы и представить результаты, дадим краткое описание физических явлений.

Кристаллизация расплава происходит за время $t_{frz} \sim R_{1/e}^2/\chi \approx 30 \div 40$ нс, где температуропроводность твердого или жидкого серебра при интересующих нас плотностях и температурах равна соответственно $\chi \approx 1.7 \div 0.9$ см^2/с. Важно то, что скорость рекристаллизации $v_{\rm frz}$ и скорость движения v пленки, во-первых, одного порядка, и, во-вторых, скорость $v_{frz} = \chi/R_{1/e} = 77 \div 40$ м/с порядка предельной скорости $v_{\rm lim} \approx 70$ м/с движения фронта кристаллизации в серебре. Величина $v_{\rm lim}$ лимитируется темпом диффузии атомов в расплаве. Выше $v_{\rm lim}$ скорость *фронта* замерзания $v_{\rm frz}$ подняться не может (предельно быстрая кристаллизация на фронте). При еще более высоких темпах охлаждения начинается кристаллизация в объеме (т.е. впереди фронта замерзания). Соответственно фронт превращается в широкую зону смеси растущих кристаллитов и жидкой фазы. В наших опытах кристаллизация идет в неравновесном режиме [4, 6, 19], температура жидкой фазы опускается на сотни градусов ниже температуры плавления. Разумеется, это вызвано тем, что $v_{\rm frz} \sim v_{\rm lim}$ – диффузия тепла быстрая, а диффузия атомов (и соответственно $v_{\rm lim}$) медленная. При неравновесном замерзании формируется твердое тело с мельчайшими кристаллитами (нанокристаллиты [6, 19]).

Как сказано, твердая и жидкая части купола разделены зоной кристаллизации, распространяющейся по расплаву. Формирование твердой части, составленной из нанокристаллитов, из жидкого купола происходит одновременно с сильнейшими упругопластическими деформациями, связанными с гидродинамическим движением купола [4, 6]. Это так, поскольку $v_{\rm frz} \sim v$. Почему гидродинамическая скорость v попадает в диапазон $10 \div 100$ м/с порядка $v_{\rm lim}$? Речь идет о скоростях пленки v после ее сепарации от подложки. Эта скорость зависит от поглощенной энергии F_{abs} по закону $v_{cm}[\text{m/s}] = 1.9 F_{abs}[\text{mJ/cm}^2]$ (см. дополнительный материал). Здесь и далее $v_{cm}(x, y)$ – это локальная (в точке x, y) на плоскости подложки скорость центра масс пленки. Как видим, при слабом сцеплении пленки с подложкой (это так для пары Ag–SiO_2) скорость пропорциональна локальному поглощенному флюенсу F_{abs}. Далее используем обозначение v_{cm} вместо v. Нас интересует диапазон относительно малых значений F_{abs}, когда $v_{cm} < 100$ м/с. Дело в том, что только

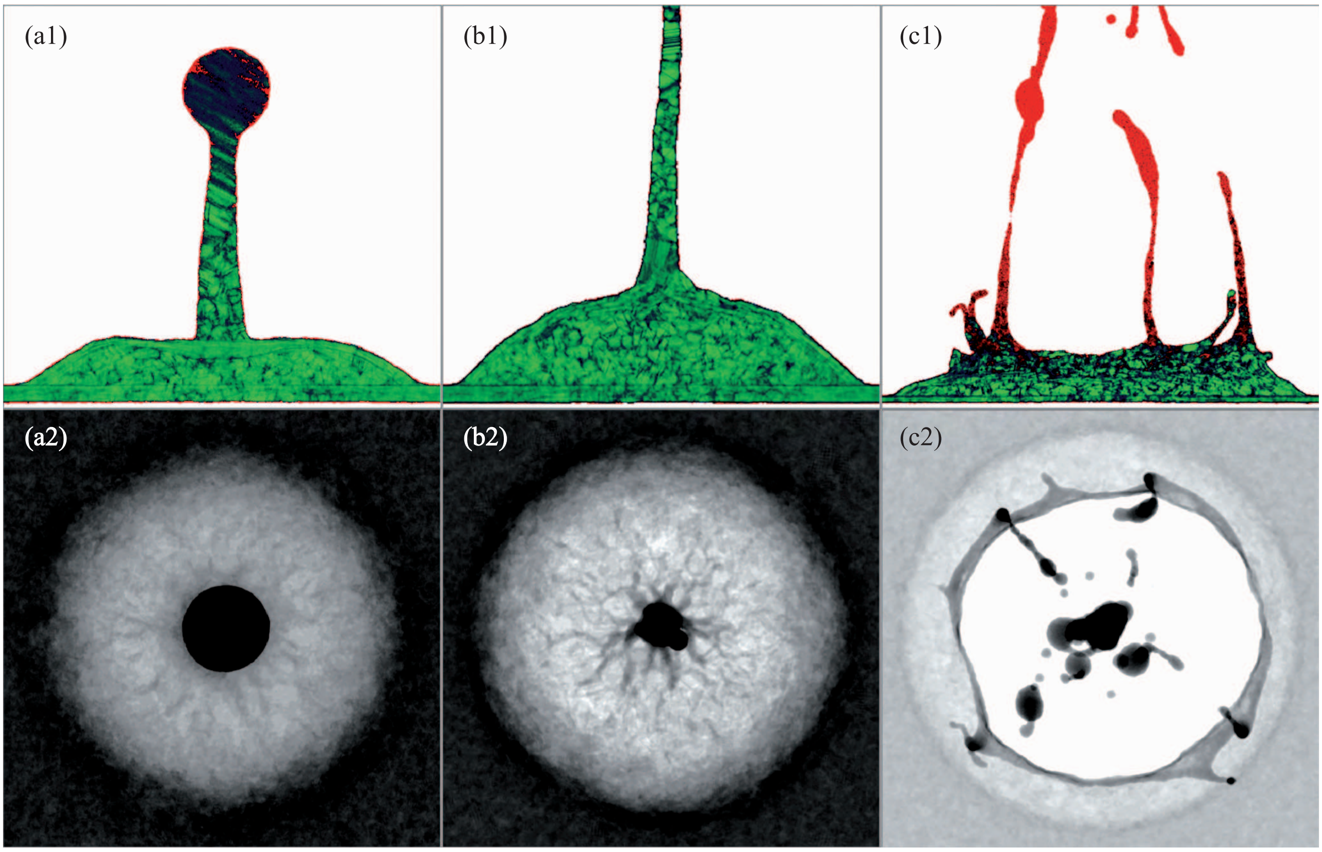

Рис. 4. (Цветной онлайн) Верхняя группа представляет вид сбоку на морфологию, близкую к финальной, когда остающаяся на подложке структура почти полностью затвердела. Показано распределение параметра атомного порядка, характеризующего кристаллическое (зеленый цвет) или жидкое (красный цвет) состояние металла, см. текст. Использованный центрально-симметричный параметр атомного порядка определяется расположением соседних атомов относительно атома, выбранного в качестве центра. В расчете пленка из золота (Au). Нижняя группа дает распределение Au вдоль поверхности подложки, т.е. это вид сверху на почти сформировавшуюся остаточную структуру. Градация степени серости пропорциональна массе M[г/см^2] Au на перпендикулярном к плоскости подложки луче зрения – в точности как в примененном в измерениях методе ЭДРС. Пары кадров (a1, a2), (b1, b2), (c1, c2) по вертикали – это три разных расчета, относящиеся к случаям на рис. 1, 2 и 3 соответственно

при малых скоростях $v_{cm} < 100$ м/с возможно появление структур, показанных на рис. 1 и 2. При высоких скоростях в пленке остается дырка (см. рис. 3).

Отслоение пленки лазерным импульсом изучается давно [22, 23] (например, в задачах очистки поверхности). В одном из вариантов очистки сепарацию вызывает короткий импульс с длительностью меньше звукового масштаба $t_s = h/c_s$. Тогда на контакте с подложкой возникают растягивающие напряжения, которые могут привести к механическому отрыву пленки от подложки (откольный отрыв пленки). Именно этот вариант изучается в настоящей статье. Однако в ранних работах не было острой фокусировки на дифракционном пределе и не рассматривалось формирование структур вида конусов с остриями в комбинированных процессах плавления, капиллярной динамики и рекристаллизации.

Чем обусловлено появление ограничения $v_{cm} < 100$ м/с? Оно связано с поверхностными силами, благодаря которым происходит остановка пленки, улетающей от подложки. Именно благодаря капиллярной остановке отрыва пленки и замерзанию образуются структуры на рис. 1 и 2. Капиллярный масштаб скорости равен $v_\sigma = 2\sqrt{\sigma/M} = 60$ м/с; наши параметры $\sigma \approx 900$ дин/см^2, $\rho = 10.56$ г/см^3, $h = 100$ нм, $M = \rho\, h$. Это выражение следует из сравнения плотностей (на единицу площади) поверхностной и кинетической энергий пленки: $2\sigma = \rho\, h\, v_\sigma^2/2$. Можно сказать, что скорость v_σ соответствует числу Вебера $\mathrm{We} = \rho h v^2/\sigma$ равному 4. Для удержания на расстоянии $\sim R_{1/e}$ и поворота назад улетающей пленки требуется, чтобы гидродинамическая скорость v_{cm} была меньше или сопоставима с масштабом v_σ.

Закончим на этом обсуждение физики и перейдем к описанию расчетной методики. Как преодолеть отмеченную выше трудность с 10^{11} атомов? Во-первых, задача решается в два отдельных этапа. Это этап сепарации пленки длительностью $\sim t_s = h/c_s \sim \sim 30 - 50$ пс и этап полета, остановки и замерзания длительностью $\sim R_{1/e}/u$, где $u \sim v_{cm} \sim v_\sigma \sim v_{\rm frz}$. Для анализа сепарации мы используем малость параметра $h/R_{1/e}$. Эта малость позволяет нам рассматривать каждую локальную точку на плоскости подложки в одномерном приближении либо аналитически [5], либо с помощью двухтемпературного гидродинамического кода [24] без применения громоздкой МД. В результате определяются поля скорости $v_{cm}(r)$ и температуры[4)] $T(r)$ на момент отделения пленки от подложки. Эти поля используются в качестве начальных данных при МД решении задачи о полете и остывании пленки в трехмерной геометрии.

Во-вторых, при МД-моделировании используется система из $\sim (2 \div 200) \cdot 10^6$ атомов (малая система), которая по числу атомов в $10^3 \div 10^5$ раз меньше экспериментальной (большая система). Малая система эквивалентна большой, если два безразмерных параметра (капиллярный $\Gamma_\sigma = v_\sigma/v_{cm}$ и охлаждения $\Gamma_\chi = v_{\rm frz}/v_{cm}$) одинаковы. Организация расчета под конкретный опыт следующая. Сначала подсчитываются значения Γ_σ, Γ_χ в конкретном опыте. Для этого требуются сведения об F_{abs}, $R_{1/e}$. Параметры σ, χ известны из справочника. Далее требуется так подобрать величины v_{cm}, χ, σ в МД расчете, чтобы в МД значения Γ_σ, Γ_χ совпадали со значениями в конкретном опыте. Это не сложно, поскольку величина v_{cm} может быть задана произвольно, величина χ тоже варьируется произвольно, благодаря алгоритму Монте-Карло аппроксимации теплопроводности [6]. Кроме того, в определённых пределах можно менять значение σ за счет параметров межатомного потенциала, сохраняя неизменными термодинамические (теплоемкость, температура плавления, давление насыщенных паров) и механические (плотность, объемный модуль) характеристики.

Результаты расчетов для трех повышающихся значений F_{abs} собраны на рис. 4. Параметры этих расчетов подобраны так, чтобы соответствовать трем экспериментам, показанным на рис. 1, 2 и 3. А именно, расчет на рис. 4a1, a2 относится к опыту на рис. 1 (*случай 1*), расчет на рис. 4b1, b2 – к рис. 2 (*случай 2*), расчет на рис. 4c1, c2 – к рис. 3 (*случай 3*). Ситуация около порога отрыва первой капли – это случай 1. В случае 2 имеет место множественное отделение капель из струи, а в случае 3 сначала срывается струя, затем начинается срыв купола. В результате в 3-м случае в пленке образуется отверстие и остается ободок тонкого остатка пленки (как в опыте на рис. 3). Крошечные остатки нескольких струй на краю ободка видны и на рис. 3b, и на рис. 4c1, c2. На рис. 4c1, c2 концы остаточных струй находятся в жидком состоянии на показанный момент времени. Далее часть жидкости сорвется в виде малых капель, а часть кристаллизуется. Нетривиальную эволюцию в рассмотренных трех случаях иллюстрируют видеоролики 220 (*случай 1*, рис. 1), 225 (*случай 2*, рис. 2) и 226 (*случай 3*, рис. 3), приведенные в дополнительном материале.

В случае 2 (рис. 4b1, b2, 2) вылетающие капли имеют очень узкое угловое распределение. Они летят в виде цепочки. Впереди с большой скоростью движется первая очень крупная капля. Далее следуют мелкие и все более и более медленные капли. Температура капель убывает вдоль цепочки. Капли долго остаются в жидком состоянии и постепенно (после ряда капиллярных осцилляций и вязкой диссипации) принимают сферическую форму. Одна, две частицы, летящие последними, могут оторваться в кристаллическом состоянии. Они сохраняют свою удлиненную форму в направлении растягивающейся струи (см. видеоролик 225). Заостренный носик струи в случае 2, к сожалению, остался за верхней рамкой рис. 4b1. Этот носик в точности соответствует форме застывшей струи в опыте на рис. 2. Причем струя, также как на рис. 2, имеет отклонения от вертикали. Отметим также формирование радиально-лучевых возмущений, отходящих в стороны от центрального уплотнения на рис. 4b2 (случай 2). Видимо, они являются зачатками радиальных гофр на рис. 2. В случае 1 эти гофры выражены слабо и в расчете, и в эксперименте, см. рис. 4a2 и 1.

В случае 3 (рис. 4c1, c2, 3) угловое распределение капель гораздо шире. Первая капля формируется из довольно длинного отрезка верхней части струи и получается очень крупной (больше, чем в случае 2). Она летит перпендикулярно подложке. За ней следуют гораздо более мелкие капли разных размеров с заметной составляющей скорости в плоскости подложки. Вопрос о сборе нанокапель на близко расположенную подложку-приемник (ресивер) решался в работах группы из Ганновера [2, 8, 12, 18] в связи с разработкой методики LIFT. Улавливание и отскок капель от ресивера в случае гораздо большего пятна нагрева рассматривались в статье [25].

[4)] К стадии отделения пленки от подложки серебро переходит в однотемпературное состояние: $T_e \approx T_i = T$.

Вместе с полями плотности пленки $M(x,y)$[г/см^2], показанными на рис. 4 a2, b2, c2, были подсчитаны усредненные по азимутальному углу распределения $M(r)$, здесь x, y – координаты на плоскости подложки, $r = \sqrt{x^2+y^2}$– цилиндрический радиус. Они хорошо согласуются с распределениями $M(r)$ вдоль луча ожога поверхности на рис. 1–3. В частности, воспроизводится валик на границе с невозмущенной пленкой. В расчете валик появляется из-за геометрии пересечения луча с пленкой – электронный луч пронизывает серебро по вертикали к подложке, а пленка возле края купола меняет свое положение с горизонтального на наклонное. Соответственно прямолинейный луч проходит наклонную пленку наискосок относительно нормали к наклонному участку пленки. Детали расчетов вместе с динамической картиной развития процессов (видеоролики) представлены в дополнительном материале.

5. Выводы. Таким образом, в данной работе впервые проведены детальные ЭДРС-исследования радиальных профилей массовой толщины слоя серебра в пределах различных нано- и субмикроструктур – микроконусов с наноострием различных размеров, а также микроотверстий, сформированных под действием одиночных фемтосекундных лазерных импульсов с различной пиковой плотностью энергии. Полученные профили не только количественно характеризуют размеры – толщину, высоту, ширину – элементов структур, но и позволяют сделать обоснованные предположения о направлении и значении потока расплава в ходе формирования этих структур. Выводы экспериментальных исследований подтверждаются результатами молекулярно-динамического моделирования соответствующих гидродинамических процессов течения лазерно-индуцированного расплава.

Работа по эксперименту (пп. 1–3) поддержана грантом Российского научного фонда (РНФ) по проекту # 16-12-10165. Моделирование (п. 4) выполнено в рамках гранта РНФ (проект # 14-19-01599).

---

1. П. А. Данилов, Д. А. Заярный, А. А. Ионин, С. И. Кудряшов, Ч. Т. Х Нгуен, А. А. Руденко, И. Н. Сараева, А. А. Кучмижак, О. Б. Витрик, Ю. Н. Кульчин, Письма в ЖЭТФ **103**(8), 617 (2016).
2. F. Korte, J. Koch, and B. N. Chichkov, Appl. Phys. A **79**(4–6), 879 (2004).
3. Y. Nakata, N. Miyanaga, and T. Okada, Appl. Surf. Sci. **253,** 6555 (2007).
4. A. Kuchmizhak, O. Vitrik, Y.N. Kulchin, D. Storozhenko, A. Mayor, A. Mirochnik, S. Makarov, V. Milichko, S. Kudryashov, V. Zhakhovsky, and N. Inogamov, Nanoscale **8**, 12352 (2016).
5. N. A. Inogamov and V. V. Zhakhovskii, JETP Lett. **100**(1), 4 (2014).
6. N. A. Inogamov, V. V. Zhakhovsky, V. A. Khokhlov, Yu. V. Petrov, and K. P. Migdal, Nanoscale Res. Lett. **11,** 177 (2016).
7. Y. Nakata, K. Tsuchida, N. Miyanaga, and H. Furusho, Appl. Surf. Sci. **255**, 9761 (2009).
8. A. I. Kuznetsov, J. Koch, and B. N. Chichkov, Opt. Express **17**, 18820 (2009).
9. Yu. N. Kulchin, O. B. Vitrik, A. A. Kuchmizhak, V. I. Emel'yanov, A. A. Ionin, S. I. Kudryashov, and S. V. Makarov, Phys. Rev. E **90**, 023017 (2014).
10. В. И. Емельянов, Д. А. Заярный, А. А. Ионин, И. В. Киселева, С. И. Кудряшов, С. В. Макаров, Ч. Т. Нгуен, А. А. Руденко, Письма в ЖЭТФ **99**(9), 601 (2014).
11. A. Kuchmizhak, S. Gurbatov, O. Vitrik, Y. Kulchin, V. Milichko, S. Makarov, and S. Kudryashov, Sci. Rep. **6**, 19410 (2016).
12. F. Korte, J. Serbin, J. Koch, A. Egbert, C. Fallnich, A. Ostendorf, and B. N. Chichkov, Appl. Phys. A **77**, 229 (2003).
13. Yu. N. Kulchin, O. B. Vitrik, A. A. Kuchmizhak, A. V. Nepomnyashchii, A. G. Savchuk, A. A. Ionin, S. I. Kudryashov, and S. V. Makarov, Opt. Lett. **38**, 1452 (2013).
14. Ю. Н. Кульчин, О. Б. Витрик, А. А. Кучмижак, А. Г. Савчук, А. А. Непомнящий, П. А. Данилов, Д. А. Заярный, А. А. Ионин, С. И. Кудряшов, С. В. Макаров, А. А. Руденко, В. И. Юровских, А. А. Самохин, металлических пленках ЖЭТФ **146**, 21 (2014).
15. K. Sokolowski-Tinten, J. Bialkowski, A. Cavalleri, D. von der Linde, A. Oparin, J. Meyerter-Vehn, and S. I. Anisimov, Phys. Rev. Lett. **81**(1), 224 (1998).
16. V. V. Temnov, K. Sokolowski-Tinten, P. Zhou, and D. von der Linde, J. Opt. Soc. Am. B **23**, 1954 (2006).
17. S. I. Ashitkov, M. B. Agranat, G. I. Kanel', P. S. Komarov, and V. E. Fortov, JETP Lett. **92**(8), 516 (2010).
18. C. Unger, J. Koch, L. Overmeyer, and B. N. Chichkov, Optics Express **20**(22), 24864 (2012).
19. D. S. Ivanov, Z. Lin, B. C. Rethfeld, G. M. O'Connor, T. J. Glynn, and L. V. Zhigilei, J. Appl. Phys. **107**, 013519 (2010).
20. Y. Nakata, N. Miyanaga, K. Momoo, and T. Hiromoto, Appl. Surf. Sci. **274**, 27 (2013).
21. A. Kuchmizhak, S. Gurbatov, A. Nepomniaschiy, A. Mayor, Y. Kulchin, O. Vitrik, and A. Ionin, Appl. Surf. Sci. **337**, 224 (2015).
22. В. П. Вейко, А. И. Кайданов, Х. А. Ковачки, Е. А. Шахно, Изв. РАН. Сер. физ. **56**(4), 169 (1992).
23. В. П. Вейко, Е. А. Шахно, Изв. РАН. Сер. физ. **61**(7), 1367 (1997).
24. N. A. Inogamov, V. V. Zhakhovskii, and V. A. Khokhlov, JETP **120**(1), 15 (2015).
25. C. M. Rouleau, C.-Y. Shih, C. Wu, L. V. Zhigilei, A. A. Puretzky, and D. B. Geohegan, Appl. Phys. Lett. **104**, 193106 (2014).