Письма в ЖЭТФ, том 94, вып. 4, с. 289 – 292 © 2011 г. 25 августа

Наномасштабная кавитационная неустойчивость поверхности расплава вдоль штрихов одномерных решеток нанорельефа на поверхности алюминия

А. А. Ионин[△], *С. И. Кудряшов*[△1)], *А. Е. Лигачев*[°], *С. В Макаров*[△], *Л. В. Селезнев*[△], *Д. В. Синицын*[△]

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

[°]*Институт общей физики им. А.М. Прохорова РАН, 117942 Москва, Россия*

Поступила в редакцию 22 июня 2011 г.

Наноструктурирование под действием фемтосекундных лазерных импульсов с низкой плотностью энергии создает на поверхности алюминия одномерную квазипериодическую решетку штрихов-гребней, период которой ($\approx$ 0.5 мкм) определяется длиной поверхностной электромагнитной волны. Структура штрихов поверхностной нанорешетки определяется регулярными нанопичками, следующими с периодом около 200 нм. Отдельные нанопички обнаруживают кратеры вместо вершин. Это позволяет предположить формирование самих нанопичков в результате "замороженной" наномасштабной откольной абляции нанометрового слоя расплава алюминия в квазипериодических областях максимума интерференции лазерного излучения с поверхностной электромагнитной волной. Периодичность возникновения нанопичков вдоль штрихов определяется предсказанным ранее механизмом кавитационной деформации поверхности расплава в ходе макроскопической откольной абляции. Однако в данном случае кавитация носит не спонтанный, а согласованный характер (процесс типа околокритического спинодального распада).

1. В последние годы интенсивно изучаются возможности параллельного наноструктурирования поверхностей – одновременного создания поверхностных массивов наноструктур – под действием интенсивных ультракоротких (фемтосекундных) лазерных импульсов (УКИ). В рамках данной оптической нанотехнологии используется ближнепольная оптика поверхностных массивов диэлектрических наночастиц-нанолинз [1], освещаемых слабофокусированным УКИ, интерференция таких множественных УКИ [2] или одного УКИ с возбужденной им на поверхности среды поверхностной электромагнитной волной (ПЭВ) [3]. Создаваемые при этом относительно простые наноструктуры имеют вид массивов одиночных или кольцеобразных абляционных нанократеров [1], линейных одно- или двумерных поверхностных нанорешеток с абляционными бороздками или гребешками вместо штрихов соответственно [2–5]. С другой стороны, для создания уникальных наноразмерных поверхностных наноструктур со сложной топологией (например, отрицательной и положительной кривизной) в последнее время используют технологию последовательного наноструктурирования с сильной фокусировкой УКИ на поверхности мишени в субмикронное пятно. Это позволяет получить как одиночные нанократеры диаметром до 100 нм [6], так и одиночные нанопички, в том числе с "замороженными" наноструями расплава (размером до 30 нм) на их вершине [7]. Серийное воспроизведение наноструктур в последнем случае осуществляется путем сканирования поверхности под воздействием каждого нового УКИ. Механизмы формирования отдельных наноэлементов в рамках технологии последовательного наноструктурирования изучались методом молекулярной динамики. Она показала возможность создания как ранее наблюдавшихся в эксперименте отдельных нанопичков – путем незавершенной ("замороженной" на стадии отлета) откольной абляции нанометрового слоя поверхностного расплава [8], так и более топологически сложных и интересных, но до сих пор не наблюдавшихся наноструктур – связного субстананометрового нанорельефа поверхности – путем локальной откольной абляции плоской поверхности слоя такого расплава кавитационными нанопузырьками внутри него [9–10].

В настоящей статье сообщается о наблюдении квазипериодических массивов линейных последовательностей нанопичков, возникающих с регулярными интервалами около 200 нм вдоль квазипериодических линий максимума интерференции УКИ с возбуждаемой им ПЭВ, которые похожи на предсказанный в работах [9, 10] "замороженный" немонотонный промежуточный нанорельеф поверхности откалывающегося вследствие абляции расплава. Важно, что благо-

1)e-mail: sikudr@sci.lebedev.ru

даря специфическим (существенно допороговым по отношению к порогу откольной абляции) условиям воздействия и интерференционному взаимодействию УКИ–ПЭВ, обеспечивающему однородность вложения энергии вдоль линий максимума интерференции, в настоящей работе удалось совместить возможности параллельного наноструктурирования больших облучаемых площадей и одновременного создания на них наноразмерных пичков.

2. В наших экспериментах использовалась установка, включающая в себя титан-сапфировый лазер (Авеста Проект), генерирующий импульсы фундаментального излучения (центральная длина волны 744 нм, ширина полосы генерации на полувысоте около 12 нм) длительностью около 110 фс (на полувысоте) с линейной поляризацией **e** и энергией до 8 мДж [3]. Поперечное пространственное распределение лазерного поля соответствовало TEM_{00}-моде. Лазерное излучение в нормальном падении подфокусировалось в пятно диаметром 0.3 мм (на уровне $1/e$) на сухой поверхности мишени (пластины химически чистого, механически полированного (rms ≤ 50 нм) алюминия толщиной около 2 мм), расположенной на трехмерной моторизованной подвижке с компьютерным управлением. Энергия лазерных импульсов регулировалась с помощью отражательного поляризационного ослабителя (Авеста Проект) и контролировалась с помощью калиброванного фотодиода DET-210 (Thorlab), засвечиваемого слабым лазерным бликом через поворотное диэлектрическое зеркало. Запись наноструктур (квадрата 4×4 мм^2 из отдельных дорожек длиной 4 мм с периодом 600 мкм) производилась путем линейного сканирования поверхности мишени со скоростью $|\mathbf{v}| = 6$ мкм/с при малой энергии лазерного излучения (350 мкДж) и упомянутой выше слабой фокусировке во избежание заметной деградации распределения плотности энергии на поверхности мишени, связанной с самофокусировкой в воздухе (критическая мощность самофокусировки ≈ 3 ГВт [11]) и сопутствующими ей эффектами хроматической эмиссии, филаментации и рассеяния на плазме [12, 13].

3. Наноструктуры, сформированные на поверхности мишени алюминия при низкой плотности энергии ($F \approx 0.5$ Дж/см^2, что чуть ниже порога одноимпульсной откольной абляции при нормальном падении УКИ, $F_{\mathrm{spall}} \approx 0.7$ Дж/см^2 [14]) и числе падающих импульсов $N \approx 500$, имеют вид одномерной решетки штрихов-гребней, ориентированных перпендикулярно вектору поляризации УКИ **e**, независимо от наличия на поверхности случайно ориентированных полировочных царапин, с периодом $\Lambda \approx 0.5$ мкм (рис. 1a, b), который на много порядков меньше 600-микронного периода следования линий записи в рамках наноструктурируемого квадрата. Сами гребнеобразные линейные штрихи состоят из до-

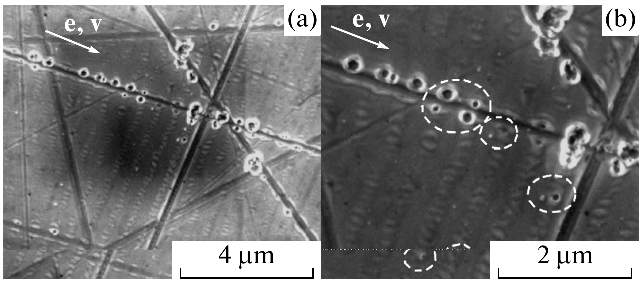

Рис. 1. СЭМ-снимки наноструктур, записанных на поверхности алюминия при плотности энергии $F = 0.5$ Дж/см^2 и $N = 500$, при увеличении 30000 (a) и 60000 (б). Стрелки показывают направления вектора поляризации лазерного поля **e** и вектора скорости движения мишени **v**, а пунктирными окружностями выделены нанопички с кратерами вместо вершин и следами выноса материала. Темное пятно в центре (a) – результат избыточной экспозиции области электронным пучком при фокусировке

статочно выделенных регулярных нанопичков, слегка вытянутых в направлении, перпендикулярном оси штрихов, и следующих с периодом $\lambda \approx 0.2$ мкм. Примечательно, что некоторые из нанопичков имеют кратер вместо вершины и следы выброса ее материала (рис. 1b), указывающие, очевидно, на полый характер нанопичков и их откольную природу. Наиболее часто раскрытие нанопичков происходит вблизи царапин на поверхности материала, где в момент ее облучения УКИ благодаря возбуждению ПЭВ реализуется существенное усиление локального электромагнитного поля.

Интересно, что установленный период штрихов ($\Lambda \approx 0.5$ мкм) хорошо согласуется с длиной ПЭВ (0.5–0.6 мкм), возбуждаемой УКИ с длиной волны около 744 нм на плоской поверхности алюминия [15]. При этом, согласно данным предшествующих исследований, эта длина слабо зависит от условий лазерного воздействия. С одной стороны, это позволяет рассматривать сами штрихи как области максимума интерференции УКИ и ПЭВ [16–18], где, по сравнению с визуально не тронутыми соседними участками поверхности, достигается максимальное вложение энергии УКИ и могут быть реализованы пороговые условия для самой "мягкой", откольной абляции [19]. С другой стороны, согласно указанным двум фактам (аномальной ориентации ($\perp$ **e**) последовательностей нанопичков на штрихах и их резко отличающегося от периода нанорешетки $\lambda \approx 0.2$ мкм) невозможно связать возникновение этих последовательностей непосредственно с возбуждением ПЭВ. В то же время просматривающаяся в топологии нанопичков с вершинами и без них откольная абляционная природа (частично "замороженный" или свершившийся откол, рис. 2) может иметь особенности,

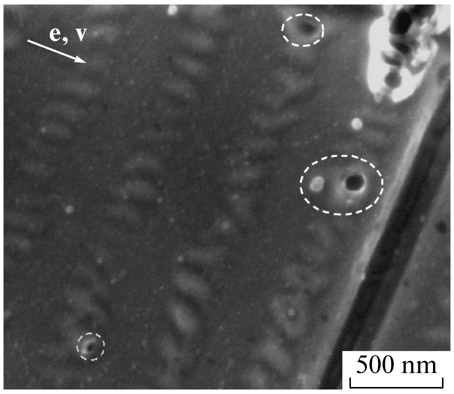

Рис. 2. СЭМ-снимок наноструктур, приведенных на рис. 1, при увеличении 120000. Стрелки показывают направления вектора поляризации лазерного поля **e** и вектора скорости движения мишени **v**, а пунктирными окружностями выделены нанопички с кратерами вместо вершин и следами выноса материала

связанные со слабо подпороговым характером абляции или наноразмерными эффектами при ее протекании.

Недавно, в рамках молекулярно-динамических исследований был предсказан механизм, вызывающий формирование нерегулярного нанорельефа на поверхности, нагретой УКИ, вследствие спонтанной кавитации (пенообразования) в разгруженном поверхностном слое расплава, искривления его поверхности или даже отрыва слоя по позициям пузырьков в слое с сохранением конечного нанорельефа отвердевших разделяющих боковых пленок пузырьков расплава (рис. 3a, b) [9–10]. Однако в настоящей работе вдоль штрихов наблюдается регулярная структура, указывающая, по аналогии, на кавитационную деформацию поверхности слоя расплава материала вдоль штрихов (максимумов интерференционного поля), но не спонтанного (нерегулярного), а согласованного (пространственно-периодического) характера, и отверждение такой промежуточной наноструктуры (рис. 3c). Возможные причины регулярности кавитации в узких (≈ 0.3 мкм) штриховых полосках перегретого расплава на поверхности могут быть связаны с кавитацией расплава когерентного типа (спинодальный распад) [20] или с еще не изученными

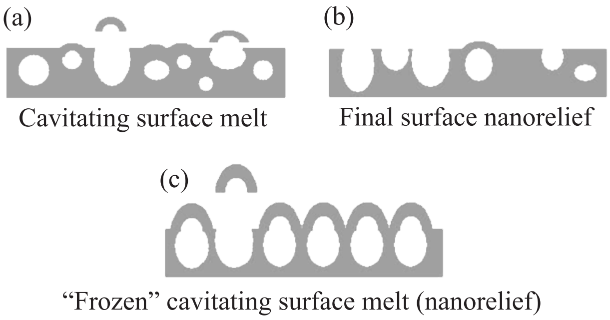

Рис. 3. Схематический вид промежуточного (a) и конечного (b) нанорельефа поверхности при откольной абляции вещества (по данным работы [9]), а также "замороженного" промежуточного (конечного) нанорельефа поверхности в условиях наноструктурирования настоящей работы (c)

особенностями (например, анизотропией) разгрузки термоупругих напряжений и откольной абляции в такой узкой наноразмерной полоске расплава.

4. Таким образом, в настоящей работе с помощью фемтосекундных лазерных импульсов на сухой поверхности алюминия получены ориентированные одномерные нанорешетки с периодом, близким к периоду возбуждаемой поверхностной электромагнитной волны, т.е. сформированные в квазипериодических областях максимумов интерференции поля лазерных импульсов и поля поверхностной волны. Структура штрихов нанорешеток задается линейной последовательностью четко выделенных нанопичков, следующих вдоль штрихов регулярно, но с многократно меньшим периодом. Наличие кратеров на месте вершин некоторых нанопичков указывает на то, что условия лазерного воздействия в области штрихов близки к порогу откольной абляции в них нанометрового слоя расплава материала. Поэтому формирование нанопичков связано в работе с "замороженной" наномасштабной откольной абляцией алюминия в областях штрихов, стабилизированной пенообразной структурой кавитирующего перегретого слоя расплава. Для узких полосок расплава в области штрихов кавитация носит не предсказанный ранее спонтанный, а согласованный характер, обусловленный, по-видимому, более высокой энергетикой кавитации (околокритический спинодальный распад) или наноразмерными эффектами релаксации в ходе откольной абляции.

Работа поддержана Российским фондом фундаментальных исследований (проекты # 10-08-00941а, 11-02-01202-а, 11-08-01165-а). Авторы признательны Е.В. Голосову и О.А. Голосовой (Центр наноструктурных материалов и нанотехнологий Белгородского госуниверситета) за подготовку снимков СЭМ.

1. Y. Zhou, M. H. Hong, J. Y. H. Fuh et al., Appl. Phys. Lett. **88**, 023110 (2006).
2. T. Jia, M. Baba, M. Suzuki et al., Opt. Exp. **16**, 1874 (2008).
3. Е. В. Голосов, А. А. Ионин, Ю. Р. Колобов и др., ЖЭТФ **140**, 21 (2011).
4. С. В. Заботнов, Л. А. Головань, И. А. Остапенко и др., Письма в ЖЭТФ **83**, 76 (2006).
5. T. H. R. Crawford and H. K. Haugen, Appl. Surf. Sci. **253**, 4970 (2007).
6. F. Korte, J. Koch, and B. N. Chichkov, Appl. Phys. A **79**, 879 (2004).
7. A. I. Kuznetsov, J. Koch, and B. N. Chichkov, Appl. Phys. A **94**, 221 (2009).
8. D. S. Ivanov, Z. Lin, B. Rethfeld et al., J. Appl. Phys. **107**, 013519 (2010).
9. В. В. Жаховский, Н. А. Иногамов, К. Нишихара, Письма в ЖЭТФ **87**, 491 (2008).
10. N. A. Inogamov, V. V. Zhakhovsky, A. Y. Faenov et al., Appl. Phys. A **101**, 87 (2010).
11. A. Couairon and A. Mysyrowicz, Phys. Reports **441**, 47 (2007).
12. С. М. Климентов, Т. В. Кононенко, П. А. Пивоваров и др., Квант. электрон. **32**, 433 (2002).
13. А. А. Землянов, А. А. Ионин, Ю. Э. Гейнц и др., ЖЭТФ **138**, 822 (2010).
14. С. И. Кудряшов, В. И. Емельянов, Письма в ЖЭТФ **73**, 751 (2001).
15. Е. В. Голосов, А. А. Ионин, Ю. Р. Колобов и др., Рос. Нанотехнол. **6**, 59 (2011).
16. С. А. Ахманов, В. И. Емельянов, Н. И. Коротеев, В. Н. Семиногов, УФН **147**, 675 (1985).
17. М. Б. Агранат, С. И. Анисимов, С. И. Ашитков и др., ЖЭТФ **115**, 675 (1999).
18. В. С. Макин, Р. С. Макин, А. Я. Воробьев, Ч. Гуо, Письма в ЖТФ **34**, 55 (2008).
19. Н. А. Иногамов, В. В. Жаховский, С. И. Ашитков и др., ЖЭТФ **134**, 5 (2008).
20. В. П. Скрипов, А. В. Скрипов, УФН **128**, 193 (1979).