



УДК 536.421

*Н.В. Андреева, Ю.И. Пестов, В.С. Макин,
В.Е. Привалов, А.Э. Фотиади*

**УПРАВЛЯЕМОЕ ФОРМИРОВАНИЕ МИКРОКОНУСОВ
НА СВЕРХТУГОПЛАВКИХ МЕТАЛЛАХ
ПРИ МНОГОИМПУЛЬСНОМ ЛАЗЕРНОМ ОБЛУЧЕНИИ**

*N.V. Andreeva¹, Yu.I. Pestov², V.S. Makin³,
V.E. Privalov⁴, A.E. Fotiadi⁵*

^{1, 4, 5} St. Petersburg State Polytechnical University,
29 Politekhnikeskaya St., St. Petersburg, 195251, Russia.

^{2, 3} Scientific Research Institute for Optoelectronic Instrument Engineering, PLC,
P.O. Box 23, Sosnovy Bor, 188540, Russia.

**CONTROLLED MICROCONES FORMATION ON HIGH
REFRACTORY METALS UNDER MULTIPULSED LASER
IRRADIATION**

Рассмотрена проблема управляемого формирования единичных острых микро- и наноструктур под действием серии импульсов лазерного излучения. Экспериментально показана возможность формирования выступов конического типа высотой порядка 50 мкм на поверхностях сверхтупоплавких металлов под действием серии из ста и более субмиллисекундных импульсов.

ЛАЗЕРНОЕ ИЗЛУЧЕНИЕ. ПЛАВЛЕНИЕ. КРИСТАЛЛИЗАЦИЯ. СВЕРХТУГОПЛАВКИЙ МЕТАЛЛ. НАНООСТРИЕ. ПОВЕРХНОСТНОЕ НАТЯЖЕНИЕ. СМАЧИВАНИЕ.

The problem of controlled formation of single tip-shaped micro- and nanostructures under the action of series of laser pulses have been considered. The possibility of production of tip-shaped bumps with heights up to 50 micrometers on the surface of high refractory metals under the action of the order of 100 submillisecond pulses have been experimentally shown.

LASER IRRADIATION. MELTING. CRYSTALLIZATION. HIGH REFRACTORY METAL. TIP-SHAPED NANOSTRUCTURE. SURFACE TENSION. WETTING.

В настоящее время наблюдается повышение интереса к методам формирования структур острейного типа на поверхности материалов и практическому применению как одиночных микро- и нанострий конического типа, так и их неупорядоченных и упорядоченных ансамблей (растров). Лазерно-индуцированное формирование микро- и наноструктур рельефа на поверхности полупроводников и металлов [1 – 9] обладает преимуществами по сравнению с методами фотолитографии и ионного

травления, так как позволяет получать структуры рельефа быстро и за меньшее число стадий. Однако, поскольку физические процессы (плавление, испарение, плазмообразование, термоэмиссия заряженных частиц, течение расплава, капиллярные явления, химические реакции, конденсация, затвердевание и т. п.), протекающие при импульсном лазерном облучении, в том числе многократном, и после его окончания, многочисленны и взаимосвязаны, до настоящего времени не существует удовлет-

ворительного понимания причин и механизмов формирования лазерно-индуцированных конусообразных выступов рельефа в широком диапазоне параметров лазерного облучения, важно для управления характеристиками структур рельефа.

В то же время можно выделить работы по управляемому формированию микроконусов на поверхности полупроводников и металлов в том смысле, что микроконус формируется в заданном месте после облучения одним импульсом лазера, длительность которого, как правило, превышает несколько наносекунд, а высота микроконуса зависит от энергии импульса облучения [5 – 9]. Управляемое формирование микроконусов на сверхтугоплавких металлах – вольфраме, тантале и молибдене было изучено в работах [8, 9], где был предложен физический механизм их формирования. Было показано, что изменение поверхностного натяжения расплава в окислительной атмосфере приводит к увеличению краевого угла (угла смачивания) расплавом своей твердой фазы относительно величины краевого угла в вакууме. В свою очередь, величина краевого угла определяет высоту микроконуса, формируемого в результате кристаллизации ванны расплава. В частности, в работе [9] экспериментально получены в атмосфере воздуха конусообразные выступы рельефа с радиусом кривизны вершины $r = 200 - 250$ нм – минимальным из известных в настоящее время, в рамках задачи их лазерного управляемого формирования на поверхности вольфрама.

С точки зрения расширения возможностей управления геометрическими параметрами конусообразных выступов рельефа представляет интерес изучение их формирования при многократном импульсном лазерном облучении. Отметим, что затравочные периодические неоднородности рельефа могут возникать в рамках универсальной поляритонной модели формирования периодической модуляции микрорельефа поверхности [10]. В работе [11] предложена модель формирования структур рельефа при многократном наносекундном импульсном облучении, в которой определяющую роль играет течение расплава под действием термокапиллярных сил. При этом максимумы высоты рельефа формируются на периферии распределения интенсивности облучения.

В данной работе в экспериментах на сверхтугоплавких металлах (вольфраме, тантале и молибдене) в атмосфере воздуха показано, что в некотором диапазоне значений плотности энергии импульса облучения с увеличением числа импульсов облучения N наблюдается существенное увеличение высоты вершины микроконуса над уровнем исходной поверхности металла. Предложен физический механизм данного явления, связанный с течением (перераспределением) расплава под действием капиллярных сил и с частичным смачиванием расплавом своей твердой фазы. С использованием атомно-силовой микроскопии изучена тонкая структура рельефа микроконуса, сформированного на поверхности вольфрама в атмосфере воздуха.

Эксперимент и его обсуждение

Схема экспериментальной установки представлена на рис. 1. Импульсы излучения импульсно-периодического лазера 1 (ЛТИ-205 на АИГ: Nd^{3+} , $\lambda = 1,06$ мкм), работавшего на частоте 14 Гц, выделялись электромеханическим затвором 3, ослаблялись фильтрами 4 и поворотным зеркалом 5 направлялись на линзу 6 ($F = 35$ мм), которая фокусировала лазерное излучение в пятно диаметром $D = 80 - 170$ мкм на поверхность пластины образца 7 толщиной d по нормали к ней. Параметры излучения лазера контролировались с помощью измерителя энергии и мощности лазерного излучения 11 (ИМО-2Н) и фотодиода 9 (ФД-25К). Использовался режим свободной генерации лазера 1 (длительность импульса излучения $\tau_{1/2} \cong 60$ мкс, $\tau_{1/10} \cong 100$ мкс). Для юстировки оптической схемы использовался непрерывный полупроводниковый лазер 12 ($\lambda = 650$ нм). Образец 7 в виде плоской пластинки был изготовлен из массивного тантала ($d = 1 - 2$ мм), вольфрамовой фольги ($d = 500$ мкм) или молибденовой фольги ($d = 200$ мкм). Поверхность образца из тантала перед облучением подвергалась шлифовке для удаления окисной пленки и промывалась этиловым спиртом. Образец устанавливался на XYZ-координатный стол 8, управляемый от персональной ЭВМ 10. Шаг координатного стола по X и Y – 2,5 мкм, шаг по Z – 0,625 мкм. Управление затвором 3 для выделения заданного количества импульсов лазера для облучения

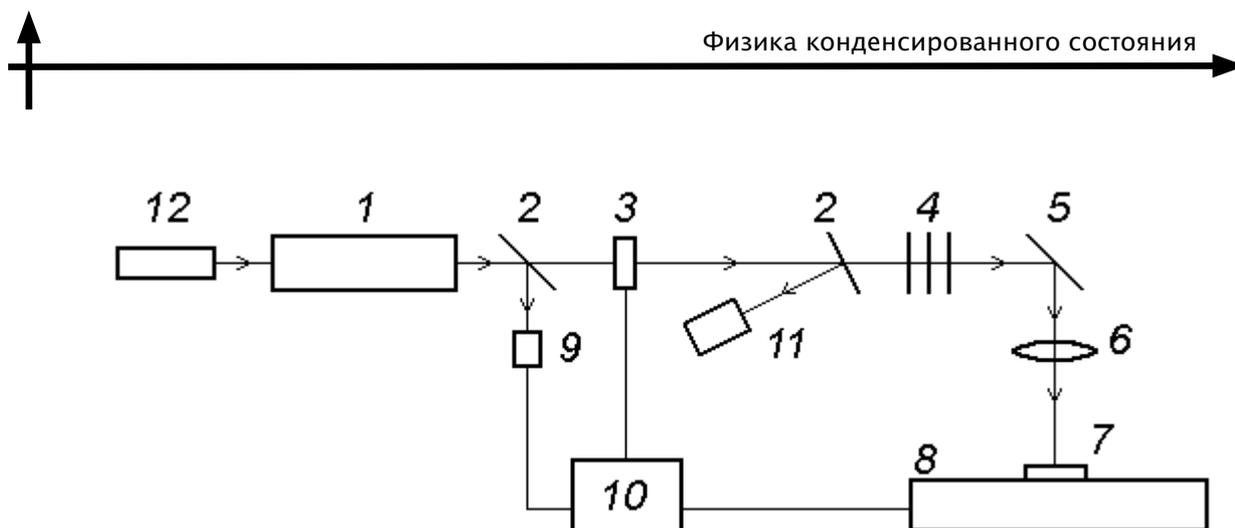


Рис. 1. Схема экспериментальной установки:

1 – импульсно-периодический лазер; 2 – светоделительные пластинки; 3 – электромеханический затвор; 4 – ослабляющие светофильтры; 5 – поворотное зеркало; 6 – линза; 7 – облучаемый образец; 8 – XYZ-координатный стол; 9 – фотодиод; 10 – персональная ЭВМ; 11 – измеритель мощности и энергии лазерного излучения; 12 – юстировочный полупроводниковый лазер

образца также осуществлялось с помощью ЭВМ 10, которая получала информацию о следовании импульсов лазера с фотоприемника 9. Облучение образца осуществлялось в атмосфере лабораторного воздуха. В эксперименте свежий участок поверхности образца облучался серией из N лазерных импульсов. Затем образец перемещался параллельно своей поверхности и перпендикулярно лучу лазера на расстояние 0,5 мм; после этого он подвергался облучению $(N + 1)$ импульсами лазерного излучения и т. д. Таким образом, в каждой серии импульсов облучался свежий участок поверхности образца. Плотность энергии облучения Q выбиралась выше порога плавления, но ниже порога выноса жидкой фазы давлением паров из сформированной ванны расплава. В процессе облучения визуально наблюдалось яркое белое свечение поверхности образца. В результате в зоне облучения наблюдалось формирование микроконуса, высота которого зависела от количества импульсов лазерного облучения. Высота H вершины микроконуса относительно уровня исходной поверхности образца измерялась как с помощью оптического микроскопа, так и с помощью сканирующего электронного микроскопа (СЭМ).

На рис. 2,а представлено полученное с помощью сканирующего электронного микроскопа изображение типичного микроконуса, сформированного на поверхности вольфрама ($N = 1$, $H = 40$ мкм). Видно, что микроконус покрыт толстым слоем рыхлого окисла, который под-

вергся сильному растрескиванию вследствие уменьшения объема (увеличения плотности) при остывании. При наблюдении в оптический микроскоп цвет окисла имел коричневатый оттенок, что свидетельствует о том, что с высокой вероятностью окисел состоял в основном из двуокиси вольфрама WO_2 . Окраски микроконуса в цвета, характерные для других окислов вольфрама, а именно в лимонно-желтый (WO_3) и синий (W_4O_{11}), не наблюдалось.

Отметим, что вольфрам в жидкой фазе при температуре, близкой к точке плавления ($3407^\circ C$), не может покрываться слоем окисла, так как все окислы, образующиеся на поверхности расплава вольфрама, мгновенно испаряются: их температура кипения существенно ниже температуры плавления вольфрама (точка кипения WO_2 – около $1727^\circ C$, а WO_3 – около $1800^\circ C$). Это утверждение справедливо также для тантала и молибдена. Следовательно, вольфрам покрывается слоем окисла уже в твердой фазе при остывании до температур, меньших температуры кипения окислов. При этом значительная часть материала окисной пленки может формироваться за счет конденсации окисла, испарившегося ранее из газовой фазы. Другая часть материала окисной пленки формируется за счет окисления вольфрама в твердой фазе. Отметим также, что при температурах выше $1500^\circ C$ возможно образование нитридов и оксинитридов вольфрама. Радиус кривизны вершины микроконуса на вольфраме ($N = 1$), покрытого окислом, находился в диа-

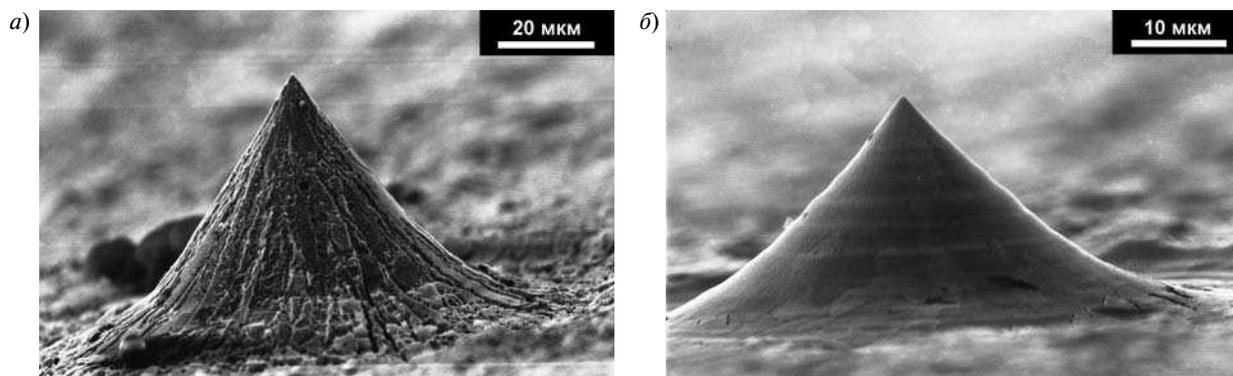


Рис. 2. Полученные с помощью СЭМ изображения типичного микроконуса до (а) и после (б) удаления окисла.

Объект сформирован на поверхности вольфрама в атмосфере воздуха ($N = 1$, $D = 80$ мкм, $Q = 550$ Дж/см²); высота $H = 40$ мкм (а) и $H \approx 20$ мкм (б), углы наблюдения относительно направления нормали к поверхности образца составляли 75° (а) и 85° (б)

пазоне от 150 до 500 нм и, по всей видимости, зависел от случайного процесса растрескивания окисной пленки.

Для определения геометрических характеристик находящегося под слоем окисла металлического вольфрамового микроконуса производилось удаление окисной пленки путем ее растворения в воде, так как окислы вольфрама обладают малой, но конечной растворимостью в этом растворителе (например, растворимость $WO_3 - 0,02$ г/л). Растворение окисной пленки осуществлялось путем погружения того же образца в 500 мл дистиллированной воды при температуре $80^\circ C$ на период времени более 200 ч. Затем образец повторно исследовался на сканирующем электронном микроскопе. На рис. 2,б представлено полученное таким способом изображение типичного вольфрамового микроконуса высотой $H \approx 20$ мкм (после удаления окисла). Характерное измеренное значение радиуса кривизны r вершины вольфрамового микроконуса составляло 230 нм. Отметим, что к вероятным процессам, препятствующим получению меньшего значения r , относятся окисление вольфрама в твердой фазе при температурах ниже точки плавления металла и выше точки кипения окисла ($1727^\circ C$), а также его частичное растворение в жидкофазном окисле WO_2 в интервале температур от точки кипения до точки плавления окисла. Сравнение изображений микроконусов до и после удаления окисла (см. рис. 2,а и б) показывает, что высота металлического микроконуса почти в два раза

меньше его первоначальной высоты. Соответственно, угол при вершине металлического конуса (84°) больше угла при вершине исходного конуса (70°). Простая оценка показывает, что объем диоксида вольфрама (плотность — 11 г/см³) в исходном микроконусе сопоставим с объемом микроконуса из вольфрама (плотность — 19 г/см³).

Таким образом, микроконус, сформированный в атмосфере воздуха под действием импульса лазерного излучения, имеет двухслойную структуру. Наружный слой состоит в основном из относительно легкоплавкой двуокиси вольфрама (WO_2), которую можно удалить путем растворения в воде. Под слоем окисла находится собственно металлический вольфрамовый микроконус. Первоначально в процессе кристаллизации ванны расплава, образованной под действием лазерного облучения, формируется вольфрамовый микроконус. При этом одновременно происходит накопление диоксида вольфрама в газовой фазе (температура кипения — $1727^\circ C$), образующегося за счет взаимодействия сильно разогретого вольфрама с кислородом воздуха; вольфрам разогревается до температуры плавления ($3407^\circ C$) и испаряется с поверхности. Физический механизм формирования металлического микроконуса подробно описан ранее в работе [8] и связан с течением расплава под действием капиллярных сил, а также неполным смачиванием расплавом своей твердой фазы. Физический механизм формирования микроконуса из окисла поверх

металлического микроконуса будет рассмотрен ниже. Отметим, что микроконус, сформированный под действием многоимпульсного облучения, также должен иметь двухслойную структуру.

На рис. 3, 4 представлены экспериментальные зависимости высоты H микроконусов на вольфраме, тантале и молибдене от количества импульсов лазерного облучения N при различной средней плотности энергии в импульсе облучения Q .

Видно, что при относительно низких значениях Q высота микроконуса H возрастает с увеличением N для всех сверхтугоплавких металлов (см. рис. 3 и 4,а), хотя и не всегда монотонно. Так, при относительно низкой плотности энергии излучения $Q \approx 85$ Дж/см² на молибдене наблюдается квазимонотонное увеличение высоты острых выступов (см. рис. 4,а) вплоть до $N = 100$. Однако при $Q \approx 170$ Дж/см² наблюдаются только осцилляции величины H с увеличением N (рис. 4,б). Отметим, что при частоте следования импульсов $\nu = 14$ Гц (период следования $T = 70$ мс) расплав успевает полностью закристаллизоваться до прихода следующего импульса. Экспериментально измеренная величина радиуса кривизны вершины сформированного острия была тем меньше, чем меньше был диаметр зоны облучения, и в опытах составляла примерно 0,3 мкм.

Предложим сначала качественное объяснение эффекта увеличения высоты металлического микроконуса при многоимпульсном локальном облучении, полагая, что при воздействии

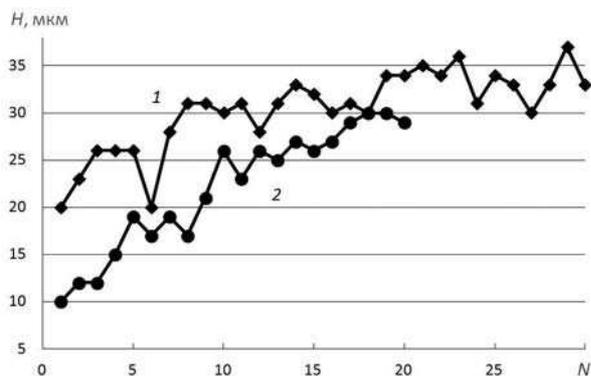


Рис. 3. Экспериментальные зависимости высоты микроконуса на поверхности сверхтугоплавких металлов от количества импульсов лазерного облучения:

- 1 – вольфрам ($D = 140$ мкм, $Q = 250$ Дж/см²);
- 2 – тантал ($D = 110$ мкм, $Q = 200$ Дж/см²)

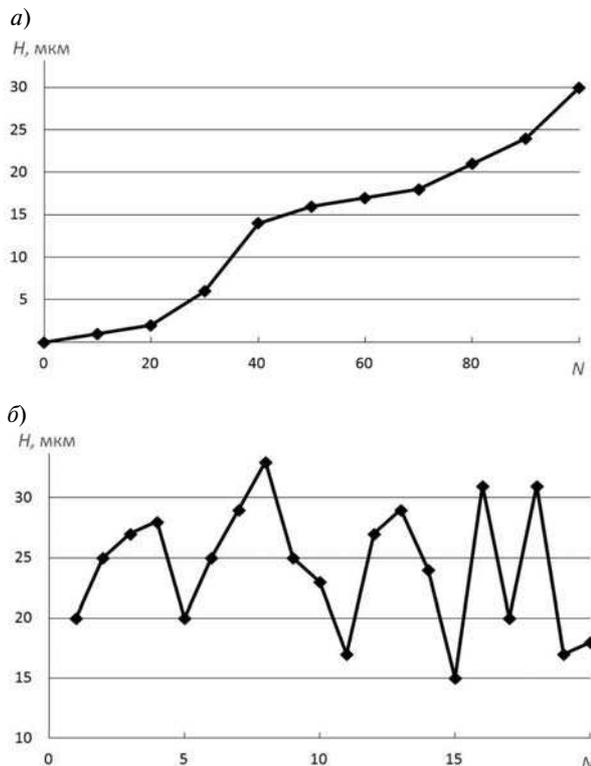


Рис. 4. Экспериментальные зависимости высоты микроконуса на поверхности молибдена от количества лазерных импульсов при различных значениях плотности энергии облучения:

- а – $Q = 85$ Дж/см² ($D = 170$ мкм);
- б – $Q = 170$ Дж/см² ($D = 120$ мкм)

каждого импульса слой окисла с тугоплавкого металла в области облучения полностью удаляется (плавится и испаряется) и происходит плавление металла. Полагаем, что распределение плотности энергии облучения является радиально симметричным, имеет максимум на оси симметрии и ось симметрии совпадает с осью микроконуса. При воздействии импульса излучения на металлический микроконус происходит формирование ванны расплава, так же как и при воздействии на исходно плоскую поверхность материала [8]. Однако, в отличие от случая плоской поверхности, при воздействии на микроконус дно сформированной ванны расплава (в момент начала кристаллизации) в месте его пересечения с осью микроконуса образует выступ твердой фазы. Формирование данного выступа на рельефе дна ванны наиболее очевидно при малой, по сравнению с высотой микроконуса H , глубине проплавления

материала. При кристаллизации работает механизм, связанный с неполным смачиванием расплавом своей твердой фазы [8]. Вследствие неполного смачивания расплав перед началом кристаллизации под действием сил поверхностного натяжения и ввиду симметрии вытесняется с периферии ванны к ее центру, стремясь свернуться в каплю, которая обволакивает выступ твердой фазы. Радиус кривизны капли определяется геометрией выступа, количеством расплава и квазиравновесным углом смачивания θ расплавом своей твердой фазы. Затухание колебаний поверхности расплава может продолжаться уже в процессе кристаллизации (см. работу [9]). Указанный выступ на рельефе дна ванны расплава и служит основой для последующей послойной кристаллизации капли расплава, приводящей к формированию микроконуса с еще большей высотой H . Причиной формирования микроконуса является самоподобие области расплава (капли) на заключительных стадиях кристаллизации [8]. В конечном счете, увеличение высоты H есть следствие перемещения нового, охваченного плавлением, материала от периферии к центру области облучения под действием капиллярных сил. Отметим, что с уменьшением глубины ванны расплава возрастает роль вязкого трения, препятствующего быстрому перемещению расплава под действием сил поверхностного натяжения, и роль термокапиллярных сил.

На поверхности металлического (для определенности, вольфрамового) микроконуса увеличенной высоты H по мере ее остывания ниже температуры кипения диоксида вольфрама происходит накопление окисла вольфрама в жидкой фазе в основном за счет его конденсации из газовой фазы и дальнейшего окисления твердофазного металла. Вследствие неполного смачивания окислом своей твердой фазы его расплав перед началом кристаллизации под действием сил поверхностного натяжения и ввиду симметрии вытесняется с периферии ванны к ее центру и стремится свернуться в каплю, которая обволакивает металлический микроконус. Следует ожидать, что ванна расплава диоксида будет обладать радиальной симметрией относительно оси металлического микроконуса. При остывании ванны (капли) диоксида вольфрама ниже температуры плавления окис-

ла ($\cong 1270^\circ\text{C}$) начинается ее послойная кристаллизация. При этом в процессе кристаллизации происходит формирование микроконуса из окисла вольфрама поверх металлического микроконуса по механизму, описанному выше для металлического микроконуса. В дальнейшем, вследствие уменьшения объема окисла при охлаждении, происходит растрескивание поверхности микроконуса из окисла. За счет увеличения от импульса к импульсу высоты металлического микроконуса и за счет накопления окисла следует также ожидать увеличения высоты результирующего двухслойного микроконуса от импульса к импульсу.

Немонотонный рост высоты H с увеличением числа импульсов N может быть связан с капиллярными колебаниями ванны расплава и с частичным выносом окислов металла и металла из зоны облучения в виде капель или пара, особенно при повышенных значениях Q . Наиболее отчетливо эти эффекты, вероятно, проявляются на молибдене при $Q = 170 \text{ Дж/см}^2$ (см. рис. 4, б).

Отметим, что при увеличении плотности энергии облучения Q энергия капиллярных колебаний ванны (капли) расплава будет возрастать, и при некотором значении Q ее может оказаться достаточно для полного отрыва части расплава в виде капли, полностью отделенной газовой фазой от исходного образца облучаемого материала. Расплав на определенном этапе кристаллизации представляет собой каплю жидкой фазы на пьедестале из твердой фазы [8]. При этом периметр сечения перетяжки, соединяющей твердую и жидкую фазы, уменьшается, что облегчает отрыв капли. Скорость таких капель может быть очень мала, так как энергия капиллярных колебаний тратится в основном на их отрыв. Вылет капли может привести к тому, что вершина микроконуса не сформируется, т. е. сформируется усеченный микроконус. Вылет капель и формирование усеченных микроконусов наблюдалось нами при облучении кремния, германия и других материалов. Данное явление и предложенный механизм генерации капель требует дальнейшего изучения.

Для исследования рельефа поверхности микроконуса, сформированного на поверхности вольфрама в воздухе, использовался атомно-силовой микроскоп Nano-DST (Santa Clara, Калифорния). Результаты исследований пред-



ставлены на рис. 5. Были обнаружены два типа структуры рельефа: зернистая и полоскообразная. Статистический анализ зернистой структуры, выполненный в программе Gwyddion, показал, что средний размер зерна составляет 90 нм, высота – 5 нм (рис. 5, а, б). Предполагается, что зернистая структура формируется при конденсации окисла из паровой фазы. Полоскообразная структура (рис. 5, в, г) с периодом $s \approx 1$ мкм и высотой полосы порядка 10 нм сформировалась, вероятно, в процессе роста кристалла окисла вольфрама из ванны в результате капиллярных колебаний ванны расплава или скачкообразного движения линии контакта трех фаз (жидкой, твердой и газообразной). Следует отметить, что выявленные структуры рельефа микроконусов сформированы на поверхности окисла вольфрама WO_2 .

Обращает на себя внимание примерное совпадение характерного периода полос с длиной волны лазерного излучения ($s \approx \lambda \approx 1$ мкм). Фрагмент полоскообразной структуры, приведенный на рис. 5, в, г, является частью кольцевых структур, которые с хорошей точностью представляют собой concentрическую резонансную решетку, на которой может осуществляться возбуждение поверхностных плазмон-поляритонов (ППП), распространяющихся в радиальных направлениях: от центра и к центру симметрии структуры [12, 13]. Волна, идущая к центру симметрии, фокусируется и рассеивается в металле, приводя к дополнительному разогреву центральной области расплава. Для областей (зон) воздействия лазерного излучения радиуса $R \leq L$ возможно преобразование ППП плоской границы раздела в волну цилин-

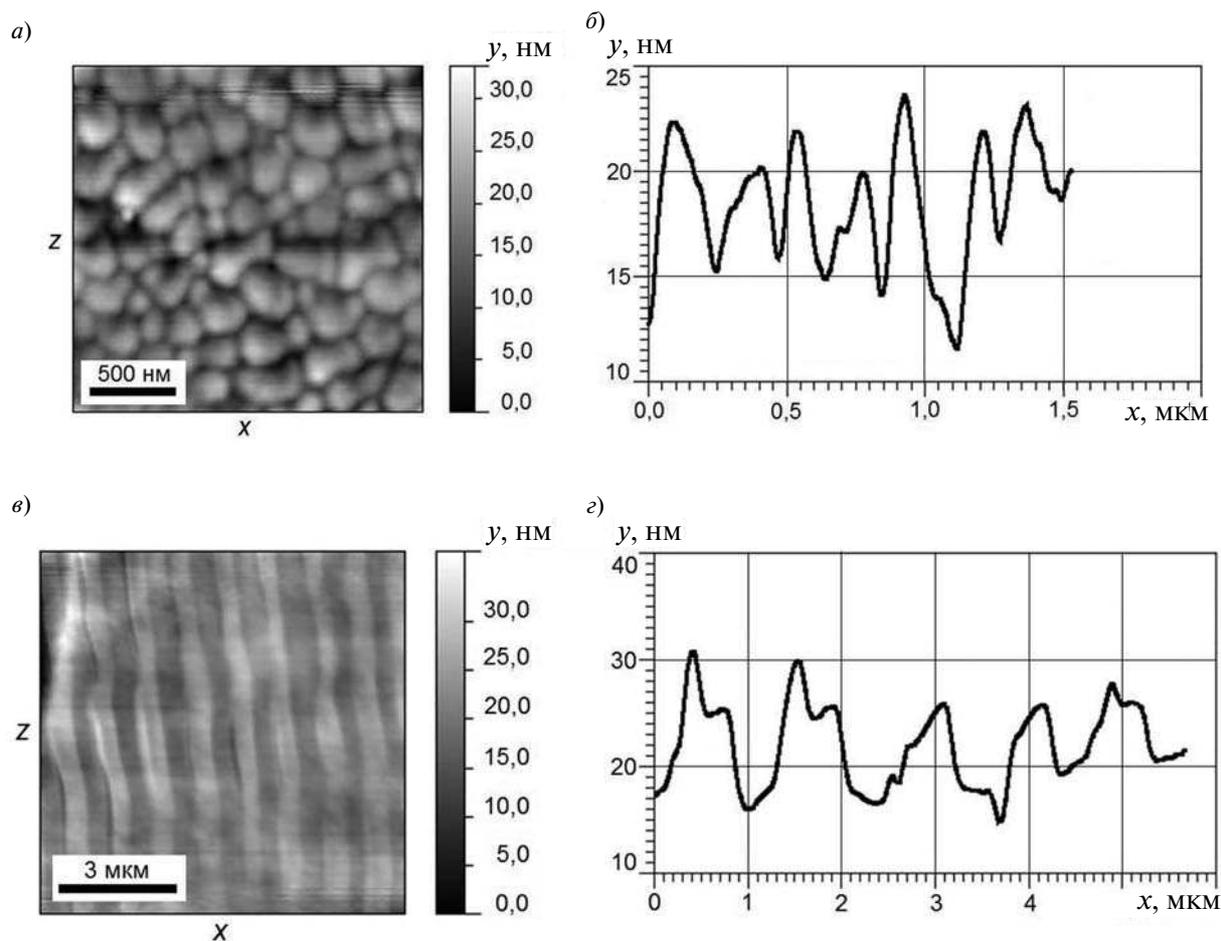


Рис. 5. Структуры рельефа на поверхности микроконуса, сформированного на вольфраме при его облучении импульсом лазера в атмосфере воздуха: а – зернистая структура, б – профиль рельефа поверхности зернистой структуры, в – полоскообразная структура, г – профиль рельефа поверхности полоскообразной структуры

дрического типа, распространяющуюся вдоль поверхности заужающегося конуса с уменьшающейся фазовой скоростью. Здесь L — длина распространения поверхностного плазмон-поляритона плоской слоистой системы металл — окисел — воздух. На вершине острия ее скорость уменьшается до нулевой: происходит преобразование цилиндрической волны в локализованный плазмон (вершины острия) [14]. Таким образом, дополнительная энергия, подводимая к вершине острия, будет запаздывать по отношению к импульсу лазерного излучения, что при ультракороткоимпульсном воздействии излучения будет влиять на характер полевого и термического испарения материала вершины острия.

Более конкретные механизмы формирования обнаруженных наноструктур рельефа требуют дальнейшего изучения.

Экспериментально исследовано формирование конусообразного выступа рельефа на поверхности сверхтугоплавких металлов в окислительной атмосфере воздуха в результате многократного воздействия импульсов лазерного излучения длительностью около 60 пс в режиме локального плавления поверхности. Обнаружен режим квазимонотонного роста высоты микроконуса с ростом числа импульсов лазерного излучения, наблюдаемый при умеренной средней плотности его энергии. Предложено качественное объяснение эффекта увеличения высоты микроконуса при многоимпульсном облучении, согласно которому происходит плавление материала (ранее не охваченного плавлением) на периферии пятна облучения каждым последующим лазерным импульсом и перемещение этого

расплава к центру пятна под действием сил поверхностного натяжения и вследствие частичного смачивания расплавом своей твердой фазы. При повышении средней плотности энергии облучения наблюдался немонотонный рост или осцилляции высоты микроконуса с увеличением числа импульсов, что может быть связано с капиллярными колебаниями ванны расплава в процессе кристаллизации и с частичным выносом окислов металла и металла из зоны облучения в виде капель или пара.

Экспериментально обнаружена и изучена структура нанорельефа поверхности микроконуса, сформированного на поверхности вольфрама в атмосфере воздуха, в виде двумерных и линейных структур глубиной порядка 10 нм и характерными пространственными масштабами: примерно 200 нм и 1 мкм, соответственно. Высказано предположение, что на «линейных» микроструктурах рельефа может осуществляться дополнительное поглощение энергии лазерного излучения за счет резонансного возбуждения поверхностных плазмон-поляритонов и концентрации их энергии в центральной части области воздействия излучения. Механизмы формирования обнаруженных структур нанорельефа требуют дальнейшего изучения.

Микроконусы из сверхтугоплавких металлов с малым радиусом кривизны поверхности вершины, полученные предложенным методом, перспективны для применения в зондовой микроскопии, полевой эмиссионной электронике, в сенсорах, биомедицине и т. п.

Работа выполнена при финансовой поддержке государства в лице Минобрнауки России, ФЦП «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» (2009-2013), контракт №16.740.11.0463 от 10.05.2011.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Watanabe, S.** *In situ* observation of self-organizing nanodot formation under nanosecond-pulsed laser irradiation on Si surface [Текст] / S. Watanabe, Y. Yoshida, S. Kayashima, [et al.] // *J. Appl. Phys.* — 2010. — Vol. 108. — P. 103510.
2. **Воронов, В.В.** Формирование конических микроструктур при импульсном лазерном испарении твердых тел [Текст] / В.В. Воронов, С.И. Долгаев, С.В. Лавришев [и др.] // *Квантовая электроника.* — 2000. — Т. 30. — № 8. — С. 710 — 714.
3. **Reinhardt, C.** Replica molding of picosecond laser fabricated Si microstructures [Текст] / C. Reinhardt, S. Passinger, V. Zorba [et al.] // *Appl. Phys. A.* — 2007. — Vol. 87. — P. 673 — 677.
4. **Nayak, B.K.** Spontaneous formation of nanospiked microstructures in germanium by femtosecond laser irradiation [Текст] / B.K. Nayak, M.C. Gupta, K.W. Kolasinski // *Nanotechnology.* — 2007. — Vol 18. — P. 195302.
5. **Wysocki, G.** Single-step fabrication of silicon-cone arrays [Текст] / G. Wysocki, R. Denk, K. Pigimayer, [et al.] // *Appl. Phys. Lett.* — 2003. — Vol. 82. — P. 692 — 693.
6. **Georgiev, D.G.** Controllable excimer-laser fabrication of conical nano-tips on silicon thin films



[Текст] / D.G. Georgiev, R.J. Baird, I. Avrutsky, [et al.] // Appl. Phys. Lett. – 2004. – Vol. 84. – P. 4881 – 4883.

7. Пат. Российская Федерация МПК⁷ С 30 В 29/62.

Способ формирования выступа типа острия [Текст] / Макин В.С., Пестов Ю.И.; заявители и патентообладатели В.С. Макин, Ю.И. Пестов. – 98113601/28; заявл. 07.07 1998; опубл. 10.10 1999. Бюл. № 28, 1999. – 295 с.: ил.

8. Пестов, Ю.И. Лазерно-индуцированное формирование конусообразных выступов на поверхности сверхтугоплавких металлов [Текст] / Ю.И. Пестов, В.С. Макин // Оптический журнал. – 2008. – Т. 75. – № 6. – С. 34 – 42.

9. Пестов, Ю.И. Формирование микроконусов на поверхности вольфрама и других сверхтугоплавких металлов под действием излучения лазера [Текст] / Ю.И. Пестов, В.С. Макин, В.Е. Привалов // Сб. докл. 21 Международной конференции «Лазеры. Измерения. Информация». – 2011. – Т. 3. – С. 369 – 381.

10. Макин, В.С. Поверхностные плазмон-поляритонные моды и наноструктурирование поверхности полупроводников фемтосекундными лазерными им-

пульсами [Текст] / В.С. Макин, Ю.И. Пестов, Р.С. Макин, А.Я. Воробьев // Оптический журнал. – 2009. – Т. 76. – № 9. – С. 38 – 44.

11. Кириченко, Н.А. Крупномасштабные структуры на поверхности металлов при лазерном воздействии большим числом импульсов [Текст] / Н.А. Кириченко // Квантовая электроника. – 2009. – Т. 39. – № 5. – С. 442 – 448.

12. Макин, В.С. Резонансное взаимодействие радиально поляризованного лазерного излучения с конденсированной средой [Текст] / В.С. Макин, Р.С. Макин // Сб. научн. тр. II Всерос. конф. по фотонике и информационной оптике. Москва, 23 – 25 января 2013 г., НИЯУ МИФИ – С. 97 – 98.

13. Zhan, Q. Evanescent Bessel beam generated via surface plasmon resonance excitation by radially polarized beam [Текст] / Q. Zhan // Optics Lett. – 2006. – Vol. 31. – Iss. 11. – P. 1726 – 1728.

14. Libenson, M.N. Surface polaritons propagation along micropipettes [Текст] / M.N. Libenson, V.S. Gurevich // Ultramicroscopy. – 1995. – Vol. 57. – P. 277 – 281.

АНДРЕЕВА Наталья Владимировна – кандидат физико-математических наук, доцент кафедры физической электроники Санкт-Петербургского государственного политехнического университета.

195251, г. Санкт-Петербург, Политехническая ул., 29
nvandr@gmail.com

ПЕСТОВ Юрий Иванович – старший научный сотрудник ОАО НИИ оптико-электронного приборостроения.

188540, г. Сосновый Бор, Ленинградская область, п/я 23

МАКИН Владимир Сергеевич – кандидат физико-математических наук, ведущий научный сотрудник ОАО НИИ оптико-электронного приборостроения.

188540, г. Сосновый Бор, Ленинградская область, п/я 23

ПРИВАЛОВ Вадим Евгеньевич – доктор физико-математических наук, профессор кафедры экспериментальной физики Санкт-Петербургского государственного политехнического университета.

195251, г. Санкт-Петербург, Политехническая ул., 29
vaevpriv@yandex.ru

ФОТИАДИ Александр Эпяминонович – доктор физико-математических наук, профессор, заведующий кафедрой физической электроники Санкт-Петербургского государственного политехнического университета.

195251, г. Санкт-Петербург, Политехническая ул., 29
fotiadi@rphf.spbstu.ru