

Особенности одноимпульсной фемтосекундной лазерной микро- и субмикромасштабной абляции тонкой серебряной пленки, покрытой микронным слоем фоторезиста

Д.А.Заярный, А.А.Ионин, С.И.Кудряшов, С.В.Макаров,
А.А.Руденко, Е.А.Дроздова, С.Б.Одинок

Экспериментально исследованы особенности абляции тонкой серебряной пленки со слоем высокопрозрачного фоторезиста толщиной 1 мкм и без него под действием одиночных жесткофокусированных фемтосекундных лазерных импульсов излучения видимого (515 нм) диапазона. Обнаружены и обсуждаются интерференционные эффекты внутренней модификации слоя фоторезиста, его откольной абляции с поверхности пленки, а также формирования сквозных полых субмикронных каналов в резисте без его откола, но с абляцией расположенной под ним серебряной пленки.

Ключевые слова: тонкая серебряная пленка с микронным слоем прозрачного фоторезиста, фемтосекундные лазерные импульсы видимого диапазона, жесткая фокусировка, субмикро- и микроабляция.

1. Введение

Фемтосекундная лазерная абляция (ФЛА) поверхности широко исследуется в последнее время в связи с перспективами прецизионной обработки поверхностей множества различных материалов – металлов, полупроводников, диэлектриков [1–3], а также формирования наноотверстий и отрыва наночастиц при наномасштабной абляции тонких пленок одиночными жесткофокусированными лазерными ультракороткими импульсами (УКИ) [1, 4–8]. Соответствующие физические механизмы – кавитационный механизм формирования суб-100-нанометровых отверстий [9, 10] и, по-видимому, наночастиц несколько меньших размеров [8–10], а также около- или сверхкритический фазовый взрыв, при котором формируются более крупные (субмикронные – микронные) отверстия и субмикронные наночастицы [11–13] – систематически исследовались путем варьирования материалов и толщины их пленки, плотности энергии и длительности лазерного излучения, причем примерно с одинаковыми результатами для нано- и фемтосекундных лазерных импульсов [9, 10, 12].

Между тем, в последние годы теоретически и экспериментально исследуется процесс ФЛА поверхностей материалов, покрытых тонким слоем оптически прозрачного диэлектрика [14–16]. Хотя теоретически до сих пор рас-

сматривался лишь аспект пространственного (механического) ограничения слоем диэлектрика абляции поверхности материала [14, 15], в экспериментах наблюдался важный физический эффект другого плана – самофокусировка и филаментация сфокусированных УКИ со сверхкритической пиковой мощностью в тонком (миллиметровом) слое диэлектрика [16]. Более того, в прозрачных диэлектриках существует возможность развития филаментации на микронных масштабах при жесткой фокусировке УКИ со сверхкритическими пиковыми мощностями [17]. В частности, полые абляционные каналы субмикронного диаметра и микронной длины наблюдались на поверхности плавленого кварца для жесткофокусированных УКИ даже при субкритических пиковых мощностях [18]. Кроме того, ранее для более длинных (наносекундных) лазерных импульсов отмечалась также оптическая интерференция в прозрачных пленках субмикронной толщины, существенно влияющая на энерговклад в поверхность материала в зависимости от толщины пленки [19] и на приповерхностное кипение субмикронной жидкой диэлектрической пленки с ее последующим отрывом, имеющим размерно-зависимые характеристики (время отрыва, скорость вылета и т.п.) [20–23]. Аналогичные эффекты абляции путем отрыва (откольной абляции жидкого слоя [24]) экспериментально наблюдались в единственной работе [25] при воздействии УКИ на поверхность кремния с оксидным слоем толщиной 20–1200 нм. Таким образом, экспериментальные фундаментальные исследования в области абляции мишеней с тонким слоем диэлектрика именно под действием сфокусированных УКИ являются единичными и дают пока крайне фрагментарную феноменологическую картину явления (в отличие от исследований с мультимикронными и более толстыми прозрачными, как правило – жидкими, пленками, по которым существует большая библиография).

В настоящей работе экспериментально исследованы особенности одноимпульсной ФЛА поверхности тонкой серебряной пленки, покрытой микронным слоем прозрачного фоторезиста, при варьируемых фокусировке и энергетике УКИ, позволяющих ожидать микромасштаб-

Д.А.Заярный, А.А.Ионин, А.А.Руденко. Физический институт им. П.Н.Лебедева РАН, Россия, 119991 Москва, Ленинский просп., 53; e-mail: aion@sci.lebedev.ru

С.И.Кудряшов. Физический институт им. П.Н.Лебедева РАН, Россия, 119991 Москва, Ленинский просп., 53; Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», Россия, 115409 Москва, Каширское ш., 31; e-mail: sikudr@sci.lebedev.ru

С.В.Макаров. Физический институт им. П.Н.Лебедева РАН, Россия, 119991 Москва, Ленинский просп., 53; Университет ИТМО, Россия, 197101 С.-Петербург, Кронверкский просп., 49; e-mail: makser@sci.lebedev.ru

Е.А.Дроздова, С.Б.Одинок. Московский государственный технический университет им. Н.Э.Баумана, Россия, 105005 Москва, 2-я Бауманская ул., 5; e-mail: odinokov@bmstu.ru

ной филаментации лазерного излучения в слое фоторезиста и связанных с этим эффектов субмикронной абляции металлической пленки под ним. При этом представляли интерес как прямая субмикронная абляция пленки сквозь слой резиста или ее абляция филаментирующим лазерным пучком, так и формирование сквозных каналов в слое фоторезиста (даже без абляции пленки) в результате его прямой или филаментационной абляции, а также в фотолитографическом варианте – после лазерной или филаментационной экспозиции фоторезиста с его последующим химическим проявлением.

2. Эксперимент

Серебряные пленки толщиной 50–55 нм напылялись на магнетронной установке для нанесения защитно-декоративных покрытий «Луч-013» на силикатные предметные стекла в виде пластинок толщиной 2 мм, длиной и шириной 20 мм, очищенных в ультразвуковой ванне. Позитивный фоторезист Microposit S-1813 наносился на поверхность серебряной пленки с помощью центрифуги в виде однородного, оптически прозрачного слоя толщиной 1–1.1 мкм [26]; часть образцов была оставлена без резиста в качестве образцов сравнения.

Одноимпульсное лазерное экспонирование каждого из образцов, размещенных на управляемой компьютером моторизованной платформе, осуществлялось тринокулярным оптическим микроскопом с использованием канала оптической визуализации, а для визуализации области экспонирования применялась окулярная камера в бинокулярном модуле микроскопа. Для экспонирования использовались УКИ волоконного лазера Satsuma (Amplitude Systemes) с активной средой, легированной ионами итербия, центральной длиной волны ~1030 нм, длительностью импульса (ширина на полувысоте) ~0.3 пс и энергией в импульсе около 8 мкДж (TEM₀₀ мода, $M^2 \approx 1.05$), удвоенные по частоте в тонком кристалле ВВО с выделением дихроичным зеркалом УКИ видимого диапазона (515 нм) с длительностью (ширина на полувысоте) ~0.2 пс и энергией до 3 мкДж. Фокусировка импульсов второй гармоники осуществлялась микрообъективами с числовыми апертурами NA = 0.1, 0.25 или 0.65 (при заполнении их апертуры) в фокальные пятна с диаметрами $D_{1/e} \approx 2.4, 0.9$ и 0.3 мкм. Поверхность мишени облучалась в режиме сканирования импульсами, следующими с частотой $f \approx 1$ Гц, скорость сканирования V составляла ~3 мкм/с. Проявление экспонированных образцов осуществлялось проявителем Microposit 303 с последующим ополаскиванием деионизованной водой и просушиванием в струе сжатого воздуха. Визуализация образцов осуществлялась с помощью сканирующего электронного микроскопа (СЭМ) JEOL 7001F.

3. Экспериментальные результаты и их обсуждение

3.1. Тестовая абляция серебряной пленки без резиста

Тестовая абляция серебряной пленки без слоя резиста проводилась с целью оценки пороговой плотности энергии, необходимой для абляции пленки данной толщины с образованием отверстия при различных NA фокусирующей оптики. При оценке предполагалось наличие раз-

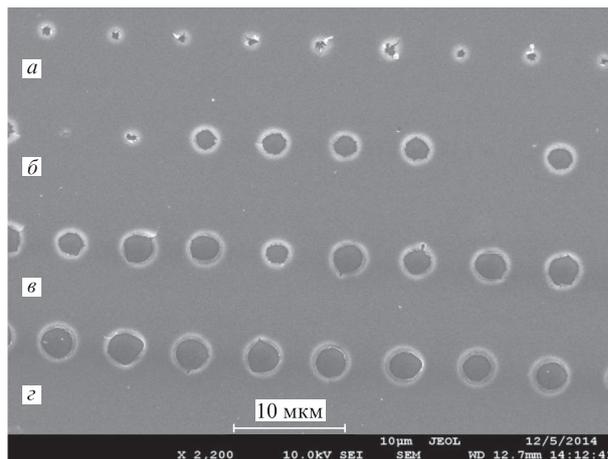


Рис.1. СЭМ-изображения массивов абляционных отверстий на поверхности серебряной пленки без резиста, сформированных при NA = 0.25 и энергиях УКИ 25 (a), 30 (б), 35 (в) и 50 нДж (г).

мерного эффекта вложения энергии УКИ с учетом латеральной теплопроводности [10]. Для каждого значения NA записывалась серия линейных массивов отверстий при разных энергиях УКИ (рис.1), и затем по стандартной формуле для распределения плотности энергии гауссова пучка определялись пороговые значения эффективной плотности энергии F_{hole} и эффективные «термические» $1/e$ -диаметры $W_{1/e}$ температурного поля на масштабах формирования отверстий [27]. Пороги F_{hole} составили 0.7 ± 0.2 Дж/см² (пороговые значения плотности падающей энергии были равны 17, 8 и 3 Дж/см² для NA = 0.65, 0.25 и 0.1 соответственно) при разбросе эффективных значений $W_{1/e}$ от 1.5 (NA = 0.65) до 2.8 (NA = 0.25) и 5 мкм (NA = 0.1), которые всегда превышали соответствующий фокальный диаметр $D_{1/e}$ на величину 1.5–2.5 мкм, опре-

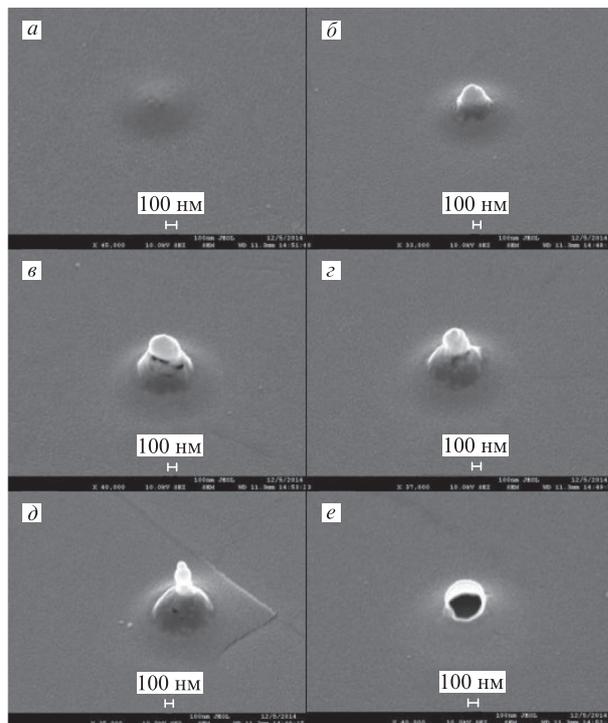


Рис.2. СЭМ-изображения под углом 40° отдельных нанозлементов, сформированных на поверхности серебряной пленки без резиста при NA = 0.65 и энергиях УКИ 12 (a), 14 (б), 15 (в), 16 (г), 17 (д) и 19 нДж (е).

деляющую масштабы латерального теплопереноса на временах формирования отверстий [9–12]. Помимо отверстий, наблюдался еще ряд промежуточных низкоэнергетических наноструктур типа нанопичков и развивающихся nanoострий (рис.2) с эффективными порогами формирования в диапазоне 0.5–0.7 Дж/см².

3.2. Интерференция УКИ в пленке резиста

Качество слоя фоторезиста – его высокая однородность и прозрачность – подтверждено экспериментально: нами наблюдались высококонтрастные максимумы интерференции между падающим УКИ (длина волнового пакета в воздухе 60–70 мкм) и его репликой, отраженной от поверхности высокоотражающей серебряной пленки, которые формировали стоячую волну в слое резиста и в воздухе вблизи образца, как это предполагалось в работе [28]. При минимальных энергиях жесткофокусированных УКИ имела место откольная абляция верхнего диска слоя фоторезиста толщиной около 0.15 мкм (рис.3,а) по первому (от поверхности воздух/резист) интерференционному максимуму, положение которого $d_1 \approx 0.16$ мкм можно сопоставить с расчетным положением m -го максимума интерференции d_m согласно интерференционному условию $d_m = m(\lambda/2n)$, где λ – длина волны УКИ, $n \approx 1.6$ – показатель преломления данного фоторезиста в видимой области.

При больших энергиях отмечался откол всего слоя резиста в центре фокального пятна, тогда как ближе к периферии откол был частичным – примерно на половинной толщине (рис.3,б). В некоторых случаях в соответствии с динамической интерференционной картиной (рис.3,в) откол сохранившейся части был ступенчатым. Наблюдаемая при этом слоистость стенок указывала на отсутствие латерального экспонированного ореола из-за оптической нелинейности процесса модификации резиста (в частности, для фоторезиста Microposit S-1813 он предполагался двухфотонным). Наконец, сам откольный диск также имел слоистую структуру (рис.3,г), причем периодичность расположения более светлых слоев фотомодификации согласовывалась с вышеуказанным интерференционным условием. Отметим, что интерференция наблюдалась более отчетливо в случае жесткой фокусировки УКИ, которая обеспечивала большие интенсивности ла-

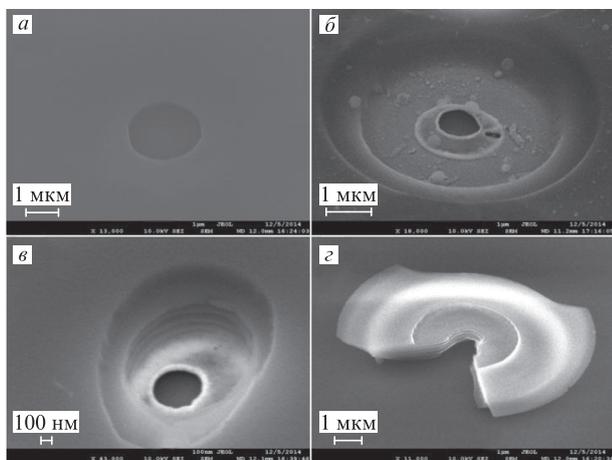


Рис.3. СЭМ-изображения под углом 40° ступенчатых кратеров на поверхности резиста (а–в) и слоистого откольного диска (г) с интерференционной структурой, сформированных на поверхности серебряной пленки при NA = 0.65.

зерного излучения, необходимые для модификации и частичного откола слоя резиста.

3.3. Откол и деформация микродисков слоя резиста

Хотя энергия, вкладываемая в серебряную пленку, должна быть чувствительна к интерференции в слое резиста [19], статистические измерения на массивах кратеров, где случайным образом проявляются незаконченные отколы, позволяют оценить пороговые плотности энергии для полного термомеханического откола дисков резиста практически без их абляционного повреждения (рис.4). Соответствующие пороги таковы: по плотности падающей энергии (без учета латерального теплопереноса) – 0.3, 3 и 8 Дж/см² (с учетом транспорта – 0.04 Дж/см² по плотности вложенной энергии) для NA = 0.1, 0.25 и 0.65 соответственно. Отлет дисков происходит за наносекунды или даже больше, поскольку как nanoострия, так и нанопички, которые, как известно, формируются за наносекунды [9–12, 29], оттиснуты на нижней стороне дисков (рис.4), что указывает на термомеханический характер откола микродисков резиста. Примечательно, что при жестких фокусировках (NA = 0.25 и 0.65) абляция резиста может происходить в отсутствие его откола (рис.4,б,г) и иметь вид полого канала вдоль перетяжки лазерного пучка или филамента; как показывает морфология этих субмикронных каналов и пересаженные вокруг продукты абляции, этот процесс будет происходить, скорее всего, в рамках фрагментационного режима [24]. По-видимому, именно при жестких фокусировках (NA = 0.25 и 0.65) энергии УКИ достаточно для абляции фоторезиста (плотности энергии 3 и 8 Дж/см² соответственно), но ее не хватает для откола его микродисков ввиду недостаточного нагрева нижележащей серебряной пленки из-за латерального теплопереноса.

3.4. Абляция серебряной пленки с отколом резиста

С превышением порога откольной абляции слоя резиста в диапазоне плотностей энергии 0.3–0.5 Дж/см² для NA = 0.1 в пленке формируются кавитационные нано- и абляционные микроотверстия, а также промежуточные испарительные структуры типа нанопичков и острий (рис.5). Примечательно, что наличие резиста облегчает

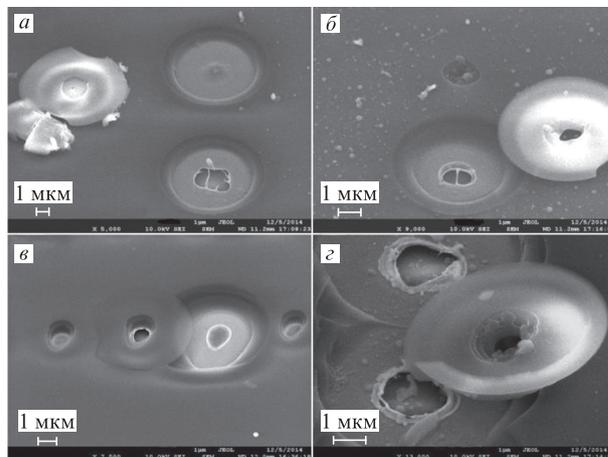


Рис.4. СЭМ-изображения под углом 40° поверхности серебряной пленки с полным (а–г) и неполным (б,в) удалением откольных дисков резиста при воздействии УКИ с NA = 0.25 (а,в,г) и 0.65 (б).

их формирование, поскольку соответствующие пороги по плотности падающей энергии в данном случае ниже, чем для пленки без резиста (3 Дж/см²). Это может быть обусловлено антиотражающим интерференционным эффектом в слое резиста, аналогичным исследованному ранее в жидких пленках [19], и механическим подавлением термоэлектронной эмиссии и сверхбыстрой лазерно-плазменной абляции пленки [30], а также сильных эффектов испарительного охлаждения [31,32]. Вместе с тем, даже при используемых субмегаваттных пиковых мощностях УКИ нельзя исключить филаментационных эффектов в слое фоторезиста для жесткофокусированных высокоинтенсивных УКИ, поскольку критическая мощность, обычно составляющая несколько МВт [16–18], быстро убывает с уменьшением длины волны УКИ [33]. Соответственно эффективная плотность энергии в возможном филаменте может существенно превысить умеренные значения плотности падающей на слой энергии (0.3–0.5 Дж/см²). Существенное снижение порога абляции материала УКИ под слоем прозрачного жидкого диэлектрика отмечалось в работе [34].

Более аккуратный подбор условий абляции в плане приближения энергии УКИ к пороговой позволяет получить в пленке отверстия с диаметрами до 100 нм (рис.6)

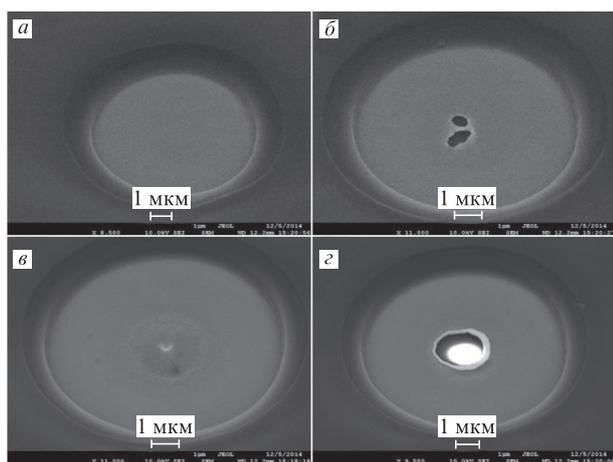


Рис.5. СЭМ-изображения под углом 40° кратеров в слое резиста со следами абляции нижележащей серебряной пленки при NA = 0.1 и энергиях УКИ 30 (а), 32 (б), 35 (в) и 37 нДж (г).

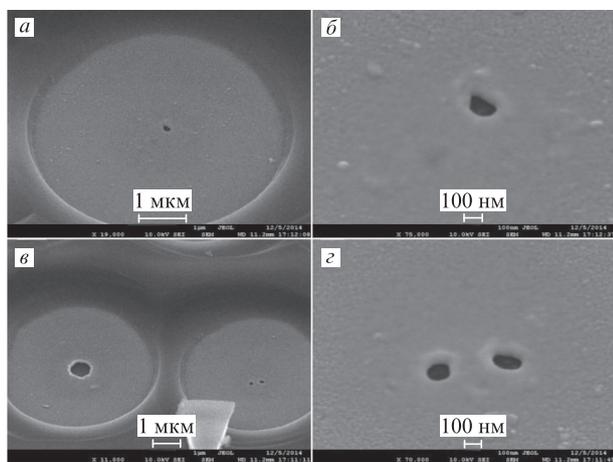


Рис.6. СЭМ-изображения под углом 40° кратеров в слое резиста со следами абляции нижележащей серебряной пленки при NA = 0.25 и энергиях УКИ 18 (а,б) и 20 нДж (в,г).

даже в случае мягкой фокусировки (NA = 0.1), что ранее отмечалось для свободных пленок [9, 10]. Тогда это связывалось с формированием узкой ванны расплава, в которой спонтанно происходит наномасштабное кипение с выбросом части пленки над расширяющимся нанопузырьком (откольная наноабляция). Спонтанный характер такого процесса прослеживается, как и для свободной пленки [10], в виде формирования множественных, например парных (рис.6,г), наноотверстий в пленке.

3.5. Абляция и проявление сквозных полых субмикронных каналов без откола резиста

Полые и неполые сквозные каналы модификации в слое резиста были получены при самой жесткой фокусировке излучения (NA = 0.65) непосредственной абляцией резиста, захватывающей и серебряную пленку (рис.7,а), при плотности падающей энергии 8 Дж/см² (рис.7,а–в), т. е. вблизи порога откола микродисков фоторезиста (см. также п.3.3 и рис.4). Вместе с тем, в режиме абляции при плотности энергии 9 Дж/см² каналы оказываются существенно шире (диаметр до 1 мкм) и заметна абляция нижележащей пленки (рис.7,г), что может быть связано как с дополнительной фотомодификацией, проявляющейся при химической проявке, так и с большим превышением порога абляции самого фоторезиста.

Следует отметить, что при данных условиях фокусировки и плотностях энергии менее 9 Дж/см² сквозные каналы после проявления экспонированного резиста не наблюдались. Одним из объяснений этого нетривиального факта может быть более высокий порог критического экспонирования слоя резиста, обусловленный высокоэнергетическим разрушением большого количества сильных связей, сопоставимого с числом мономеров, тогда как термическая фрагментационная абляция резиста может происходить с выбросом сразу больших фрагментов. С другой стороны, можно подобрать такие условия экспонирования и проявления, что при одноимпульсной экспозиции с плотностью энергии не более 9 Дж/см² за время химического проявления будет удаляться слой глубиной ~0.1 мкм (см. уширение каналов на рис.7,г и на рис.7,б,в), несущественный для формирования заметного канала в слое резиста толщиной 1 мкм и, более того, незаметный на его поверхности. По этому вопросу предполагаются дальнейшие, более детальные исследования.

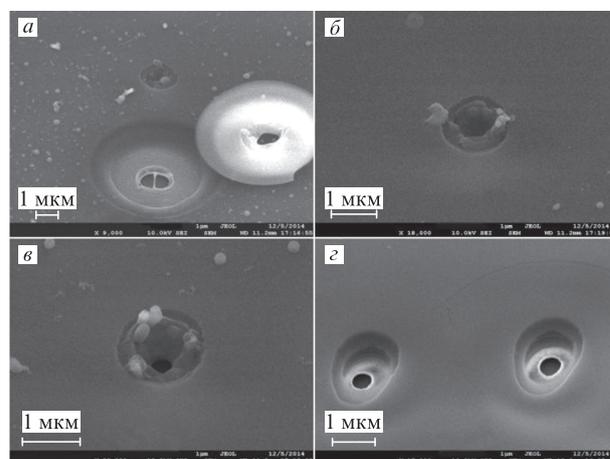


Рис.7. СЭМ-изображения под углом 40° каналов в слое резиста при NA = 0.65 и энергиях УКИ 9 (а–в) и 10 нДж (г).

4. Заключение

В результате сравнительных экспериментальных исследований абляции тонкой серебряной пленки со слоем высокопрозрачного фоторезиста толщиной 1 мкм и без него под действием одиночных жесткофокусированных фемтосекундных лазерных импульсов излучения видимого диапазона обнаружен целый ряд интересных эффектов: интерференция и внутренняя модификация в слое фоторезиста, его откольная термоупругая абляция с поверхности пленки, формирование фрагментационно-абляционных сквозных полых субмикронных каналов в резисте без его откола, но с абляцией нижележащей серебряной пленки, снижение порога формирования наноструктур и микротверстий в пленке при наличии резиста. Наряду с дальнейшими уточняющими экспериментами, полученные результаты предполагается использовать для отработки режимов формирования более сложных плазмонных наноструктур, например гиперболических метаматериалов оптического и ИК диапазона в виде массивов металлических наностержней в диэлектрических матрицах.

Работа частично поддержана РФФИ (грант № 13-02-00971-а) и Программой Президиума РАН. С.В.Макаров признателен за поддержку гранту государственной финансовой поддержки ведущих университетов РФ (субсидия №074-U01) в рамках программы ИТМО Post-Doctoral Fellowship.

- Preuss S., Spath M., Zhang Y., Stuke M. *Appl. Phys. Lett.*, **62**, 3049 (1993).
- Pronko P.P., Dutta S.K., Squier J., Rudd J.V., Du D., Mourou G. *Opt. Commun.*, **114**, 106 (1995).
- Korte F., Serbin J., Koch J., Egbert A., Fallnich C., Ostendorf A., Chichkov B.N. *Appl. Phys. A*, **77**, 229 (2003).
- Koch J., Korte F., Bauer T., Fallnich C., Ostendorf A., Chichkov B.N. *Appl. Phys. A*, **81**, 325 (2005).
- Nakata Y., Miyanaga N., Okada T. *Appl. Surf. Sci.*, **253**, 6555 (2007).
- Kuznetsov A.I., Koch J., Chichkov B.N. *Appl. Phys. A*, **94**, 221 (2009).
- Guo Z., Feng J., Zhou K., Xiao Y., Qu S., Lee J.-H. *Appl. Phys. A*, **108**, 639 (2012).
- Kuznetsov A.I., Evlyukhin A.B., Gonçalves M.R., Reinhardt C., Koroleva A., Arnedillo M., Kiyon R., Marti O., Chichkov B.N. *ASC Nano*, **5**, 4843 (2011).
- Kulchin Yu.N., Vitrik O.B., Kuchmizhak A.A., Nepomnyashchii A.V., Savchuk A.G., Ionin A.A., Kudryashov S.I., Makarov S.V. *Opt. Lett.*, **38**, 1452 (2013).
- Danilov P.A., Drozdova E.A., Ionin A.A., Kudryashov S.I., Odinokov S.B., Rudenko A.A., Yurovskih V.I., Zayarny D.A. *Appl. Phys. A*, **117**, 981 (2014).
- Кульчин Ю.Н., Витрик О.Б., Кучмижак А.А., Савчук А.Г., Непомнящий А.А., Данилов П.А., Заярный Д.А., Ионин А.А., Кудряшов С.И., Макаров С.В., Руденко А.А., Юровских В.И., Самохин А.А. *ЖЭТФ*, **146**, 21 (2014).
- Данилов П.А., Заярный Д.А., Ионин А.А., Кудряшов С.И., Макаров С.В., Руденко А.А., Юровских В.И., Кульчин Ю.Н., Витрик О.Б., Кучмижак А.А., Дроздова Е.А., Одинокоев С.Б. *Квантовая электроника*, **44**, 540 (2014).
- Емельянов В.И., Заярный Д.А., Ионин А.А., Киселева И.В., Кудряшов С.И., Макаров С.В., Руденко А.А., Нгуен Ч.Т.Х. *Письма в ЖЭТФ*, **99**, 601 (2014).
- Upadhyay A.K., Inogamov N.A., Rethfeld B., Urbassek H.M. *Phys. Rev. B*, **78**, 045437 (2008).
- Karim E.T., Shugaev M., Wu C., Lin Z., Hainsey R.F., Zhigilei L.V. *J. Appl. Phys.*, **115**, 183501 (2014).
- Ionin A.A., Kudryashov S.I., Makarov S.V., Rudenko A.A., Saltuganov P.N., Seleznev L.V., Sunchugasheva E.S. *Appl. Surf. Sci.*, **292**, 678 (2014).
- Couairon A., Sudrie L., Franco M., Prade B., Mysyrowicz A. *Phys. Rev. B*, **71**, 125435 (2005).
- Kudryashov S.I., Joglekar A., Mourou G., Herbstman J.F., Hunt A.J. *Appl. Phys. Lett.*, **91**, 141111 (2007).
- Kudryashov S.I., Allen S.D. *J. Appl. Phys.*, **95**, 5820 (2004).
- Kudryashov S.I., Allen S.D. *J. Appl. Phys.*, **93**, 4306 (2003).
- Kudryashov S.I., Allen S.D. *Appl. Phys. A*, **79**, 1737 (2004).
- Kudryashov S.I., Lyon K., Shukla S., Murry D., Allen S.D. *J. Appl. Phys.*, **100**, 056103 (2006).
- Kudryashov S.I., Allen S.D. *J. Appl. Phys.*, **100**, 104908 (2006).
- Ионин А.А., Кудряшов С.И., Селезнев Л.В., Сеницын Д.В., Бункин А.Ф., Леднев В.Н., Першин С.М. *ЖЭТФ*, **143**, 403 (2013).
- McDonald J.P., Nees J.A., Yalisove S.M. *J. Appl. Phys.*, **102**, 063109 (2007).
- Сагаталян Г.Р., Одинокоев С.Б., Кузнецов А.С., Дроздова Е.А., Соломашенко А.Б., Жердев А.Ю., Донченко С.С., Николаев В.В. *Научное обозрение*, **12**, 183 (2013).
- Liu J.M. *Opt. Lett.*, **7**, 196 (1982).
- Bulgakova N.M., Zhukov V.P., Vorobyev A.Y., Guo C. *Appl. Phys. A*, **92**, 883 (2008).
- Unger C., Koch J., Overmeyer L., Chichkov B.N. *Opt. Express*, **20**, 24864 (2012).
- Ionin A.A., Kudryashov S.I., Makarov S.V., Seleznev L.V., Sinitsyn D.V. *Appl. Phys. A*, **117**, 1757 (2014).
- Ионин А.А., Кудряшов С.И., Макаров С.В., Салтуганов П.Н., Селезнев Л.В., Сеницын Д.В. *Письма в ЖЭТФ*, **101** (5), 336 (2015).
- Заярный Д.А., Ионин А.А., Кудряшов С.И., Макаров С.В., Руденко А.А., Бежанов С.Г., Урюпин С.А., Канавин А.П., Емельянов В.И., Алферов С.В., Хонина С.Н., Карпеев С.В., Кучмижак А.А., Витрик О.Б., Кульчин Ю.Н. *Письма в ЖЭТФ*, **101** (6), 428 (2015).
- Fedorov V.Yu., Kandidov V.P. *Laser Phys.*, **18**, 1530 (2008).
- Ren J., Kelly M., Hesselink L. *Opt. Lett.*, **30**, 1740 (2005).