

НАЦИОНАЛЬНАЯ АКАДЕМИЯ НАУК БЕЛАРУСИ  
ИНСТИТУТ ТЕПЛО- и МАССООБМЕНА им. А. В. ЛЫКОВА  
Журнал основан в январе 1958 г.

---

*ТФЖ*

*И*  
**НЖЕНЕРНО-ФИЗИЧЕСКИЙ**  
**ЖУРНАЛ**

JOURNAL  
OF ENGINEERING PHYSICS  
AND THERMOPHYSICS

**Отдельный оттиск**  
**Offprint**

**Том 86, № 5**

**Vol. 86, No. 5**

СЕНТЯБРЬ–ОКТЯБРЬ  
SEPTEMBER–OCTOBER

2013

УДК 621.373:539.234

*В. К. Гончаров, Г. А. Гусаков, М. В. Пузырев***ОСАЖДЕНИЕ НАНОРАЗМЕРНЫХ ПЛЕНОК Cu И Al В ВАКУУМЕ ЛАЗЕРНЫМ МЕТОДОМ**

*Получены наноразмерные металлические пленки меди и алюминия. Пленки осаждались на подложки лазерно-плазменным методом в вакууме. Определена структура поверхностей пленок в зависимости от плотности мощности воздействующего лазерного излучения на металлические мишени. Найдены пороги испарения для алюминия и меди под воздействием наносекундного лазерного импульса.*

**Ключевые слова:** лазерно-плазменное осаждение, наноразмерные металлические пленки, эрозионная лазерная плазма.

**Введение.** Современные тенденции модификации различных изделий машиностроения и приборостроения предполагают уменьшение геометрических размеров этих изделий и их элементов. Многие из таких изделий включают в себя тонкопленочные покрытия, характеристики которых можно менять, варьируя их толщину. По функциональному назначению такие покрытия связаны практически со всеми разделами физики: механикой, электричеством, магнетизмом, оптикой.

Одной из основных областей применения тонкопленочных покрытий является микроэлектроника. В настоящий момент дальнейшее развитие изделий электронной техники предполагает повышение рабочих частот этих изделий и увеличение плотности размещения элементов в них. Это в свою очередь требует уменьшения ширины дорожек внутренних соединений. В технологическом процессе создания таких дорожек наиболее часто используется алюминий. Поэтому получение тонких алюминиевых однородных покрытий является актуальной задачей. Для интерсоединений субмикронных размеров необходимо создание дорожек с низким удельным сопротивлением и высокой электромиграционной способностью. Для этих целей могут быть использованы медные металлизированные линии и контакты, позволяющие увеличить сопротивление электромиграции и снизить электрическое сопротивление в линии. Однако, вследствие высокой подвижности атомов меди в металлах и полупроводниках, необходимо предотвращать диффузию атомов меди в окружающие материалы. Поэтому при применении медной технологии интерсоединений в сверхбольших интегральных схемах возникает необходимость создания устойчивых диффузионных барьеров, которые должны полностью со всех сторон покрывать медный проводник и толщина которых должна быть, по крайней мере, на порядок меньше минимального размера проводника по сечению. Отсюда вытекает необходимость разработки эффективных технологий формирования пленочных структур нанометровой и субнанометровой толщины. В этой связи особого внимания заслуживает метод импульсного лазерного напыления, который позволяет осаждавать чрезвычайно тонкие сплошные пленки (менее 10 нм). Данный метод обеспечивает сохранение исходного состава мишени при напылении многокомпонентных веществ. Лазерное напыление очень технологично, так как позволяет использовать мишени любого размера и формы. К основным достоинствам лазерного напыления по сравнению с другими методами можно отнести точный контроль толщины напыляемой пленки. Кроме того, напыление в вакууме обеспечивает чистоту технологического процесса.

Определение энергетических параметров разлетной плазмы (энергетического спектра ионов, электронной температуры, плотности плазмы), зависимости этих параметров от энергии лазерного импульса и их пространственной эволюции и угловой зависимости представляет интерес в случае импульсного лазерного осаждения тонких металлических пленок.

**Постановка задачи.** Для многих технологических процессов и, прежде всего, для технологии формирования проводящих дорожек, имеет важное значение осаждение однородных металлических покрытий. Вместе с тем, известно, что при лазерном распылении металлических мишеней возможно образование на поверхности осаждаемой пленки застывших капель металла. Формирование жидкокапельной фазы в лазерных эрозионных факелах металлов может происходить за счет трех механизмов. Самые крупные жидкие капли формируются за

счет гидродинамического механизма [1–3]. Их размер зависит от многих факторов (пространственно-временной формы лазерных импульсов, условий фокусировки, чистоты материала мишени и разновидности металлов). Диаметр таких частиц находится в пределах 1–100 мкм. За счет объемного парообразования формируются частицы материала мишени диаметром 0.04–1 мкм в зависимости от условий лазерного воздействия [4]. При облучении металлических мишеней одиночными лазерными импульсами короткой длительности в эрозионном лазерном факеле в основном формируются частицы материала мишени за счет конденсации продуктов разрушения [5], их диаметр обычно составляет 40–60 нм. При воздействии на металлические мишени лазерных импульсов в частотном режиме, благодаря синергетическим процессам, в эрозионном лазерном факеле могут формироваться частицы конденсированной фазы материала мишени за счет всех трех указанных механизмов. При этом преобладание того или иного механизма зависит от условий воздействия (энергии в отдельном лазерном импульсе, фокусировки и частоты лазерных импульсов, скорости перемещения лазерного луча по поверхности мишени).

В этой связи, в настоящей работе ставилась задача исследовать процессы взаимодействия мощного импульсного лазерного излучения с поверхностью алюминиевой и медной мишеней и подобрать режимы облучения таким образом, чтобы получить эрозионные лазерные факелы с минимальным содержанием жидкокапельных частиц. Выбор в качестве исследуемых материалов алюминия и меди обусловлен описанными выше перспективами использования технологии формирования наноразмерных пленок данных материалов в микроэлектронике.

**Экспериментальное оборудование.** Для осаждения пленок применялся импульсный  $YAG:Nd^{3+}$  лазер LS-2137 фирмы Lotis-III с длиной волны  $\lambda = 1064$  нм и длительностью импульса по полуширине  $\tau = 20$  нс. Частота следования лазерных импульсов равнялась 10 Гц. Длительность осаждения составляла 1 ч. Мишени устанавливались под углом  $45^\circ$  к оси лазерного пучка. В качестве подложек использовался кремний и стекло. Осаждение проводилось в вакууме при давлении остаточных газов  $\sim 10^{-3}$  Па. Подложки располагались параллельно поверхности металлической мишени. Расстояние между подложкой и мишенью составляло 10 см. Мишень вращалась со скоростью 2 об/мин, чтобы предотвратить образование глубокого кратера на поверхности мишени, что может сказаться на пространственной форме эрозионного факела. Эрозионный след на мишени представлял собой окружность диаметром 15–20 мм с различной шириной следа в зависимости от типа мишени и условий эксперимента. Мишени были изготовлены из технически чистых алюминия и меди.

Структура поверхности пленок изучалась на растровых электронных микроскопах LEO 1455 VP фирмы Carl Zeiss (Германия) и Hitachi S-4800 (Япония). Толщина покрытий определялась при помощи профилометра Talystep (США). Спектральные характеристики осажденных пленок в диапазоне 200–900 нм исследовались с использованием спектрофотометра Cary300 (Varian, США). Ширина кратера на поверхности мишени регистрировалась с помощью микроскопа МКТФ-1. Для изучения влияния параметров лазерного излучения на энергетические характеристики алюминиевой плазмы проводились времяпролетные зондовые измерения по методике, описанной в [6]. В качестве ионного зонда использовалась медная пластина  $20 \times 20$  мм. Расстояние между мишенью и коллектором во всех экспериментах составляло 10 см. Сигнал с зонда регистрировался при помощи скоростного осциллографа Tektronix TDS 2022B.

**Обсуждение результатов.** Поскольку основным параметром лазерного излучения, определяющим физические процессы при разрушении лазерной мишени, является плотность мощности лазерного излучения, а распределение энергии по сечению лазерного пучка близко к гауссовому, то следует определиться с оценкой некоторой усредненной плотности мощности лазерного излучения при разрушении мишени.

На рис. 1 изображено пространственное распределение плотности мощности лазерного излучения при различных диаметрах пятна облучения и проведена граница интенсивного испарения (кипения) для алюминиевой мишени. Эксперименты показали, что при одной и той же энергии лазерного импульса, равной 230 мДж, при пятне облучения 1 мм кратер имеет диаметр 0.9 мм, при пятне облучения 2 мм — 1.1 мм, а при пятне облучения 3 мм — 0.5 мм. Наблюдаемая картина связана с уменьшением локальной плотности мощности излучения с ростом диаметра лазерного пятна. При диаметре лазерного пучка 3 мм на краях пятна плотность мощности оказывается недостаточной для начала эффективного испарения материала мишени. Средняя плотность мощности воздействующего лазерного излучения на мишени изменялась в диапазоне  $1.5 \cdot 10^8$ – $2.5 \cdot 10^9$  Вт/см<sup>2</sup>. Следует отметить, что при этом максимальная плотность мощности с учетом гауссова распределения энергии в пятне изменялась в пределах  $4.5 \cdot 10^8$ – $7.5 \cdot 10^9$  Вт/см<sup>2</sup>.

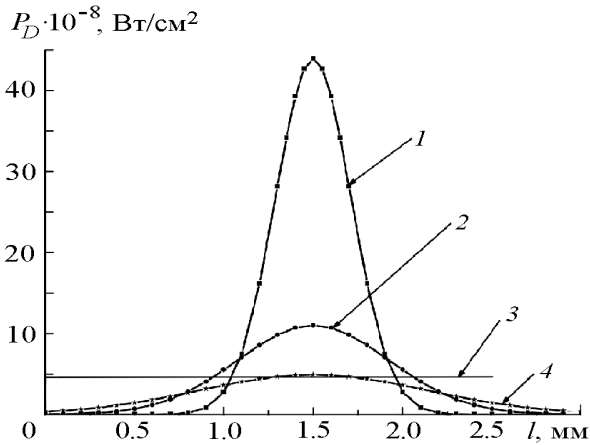


Рис. 1. Распределение плотности мощности лазерного излучения при различных диаметрах пятен облучения: 1 —  $d = 1$  мм; 2 — 2; 3 — 3; 4 —  $P_D^{th}$

С точки зрения определения эффективности осаждения металлических покрытий, важно знать пороговую плотность мощности лазерного излучения, при которой начинается интенсивное испарение материала мишени. Для оценки данного параметра можно использовать описанные выше результаты по исследованию эрозионного кратера. Поскольку при диаметре лазерного пучка 3 мм на краях пятна плотность мощности является недостаточной для начала испарения материала мишени, то, сравнивая размеры пятна облучения (3 мм) и величину эрозионного кратера (0.5 мм) с учетом гауссова распределения энергии в пятне (рис. 1), можно сделать вывод, что для алюминия пороговая плотность мощности лазерного излучения составляет  $4.5 \cdot 10^8$  Вт/см<sup>2</sup>. Аналогично определялась пороговая плотность мощности для меди. Она составляет  $7.6 \cdot 10^8$  Вт/см<sup>2</sup>. Следует заметить, что все эти рассуждения и объяснения справедливы для коротких лазерных импульсов (~20 нс).

Важным параметром, от которого в дальнейшем зависит рост пленки, является скорость ионов в плазме. Поэтому в настоящей работе выполнены исследования по регистрации зондовых времяпролетных характеристик ионов и определению энергии ионов в плазме.

На рис. 2 приведены типичные зависимости ионного тока через зонд от времени для различных плотностей мощности лазерного излучения при воздействии на алюминиевую мишень. За нулевой отсчет по оси абсцисс взято начало лазерного импульса. Из рисунка следует, что для всех исследованных плотностей мощности лазерного излучения плазменный факел имеет четко выраженный фронт быстрых ионов, за которым следует широкий "хвост" медленных частиц. Подобная картина наблюдалась в [6] для случая лазерной эрозии графита. Авторы [6] связывают данный эффект с ускорением частиц за счет поглощения части энергии лазерного импульса плазменным факелом. Однако, на наш взгляд, наблюдаемая картина может быть связана с реальной формой лазерного импульса или с процессами испарения атомов с поверхности мишени после окончания лазерного импульса в результате радиационного нагрева поверхности мишени плазмой факела и обратным потоком частиц из плазмы.

На рис. 3 приведена зависимость средней энергии ионов в алюминиевой и медной плазме от средней плотности мощности лазерного излучения. Средняя энергия ионов рассчитывалась из времяпролетных спектров при помощи выражения

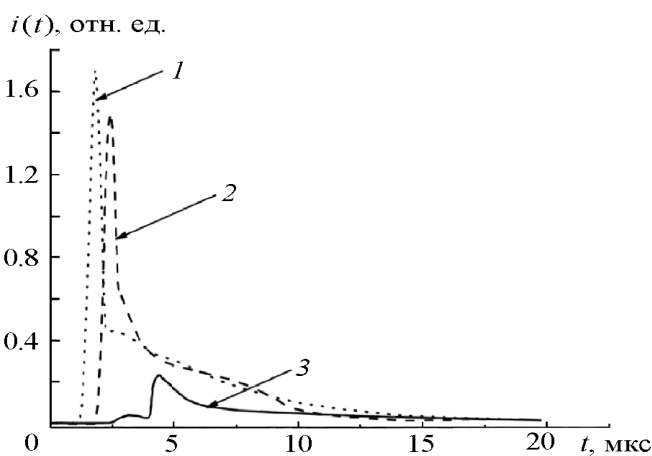


Рис. 2. Зондовые времяпролетные кривые для эрозионных факелов ионов алюминия, полученные при различных средних плотностях мощности лазерного излучения: 1 —  $P_D^{av} = 14.6 \cdot 10^8$  Вт/см<sup>2</sup>; 2 —  $3.66 \cdot 10^8$ ; 3 —  $1.63 \cdot 10^8$

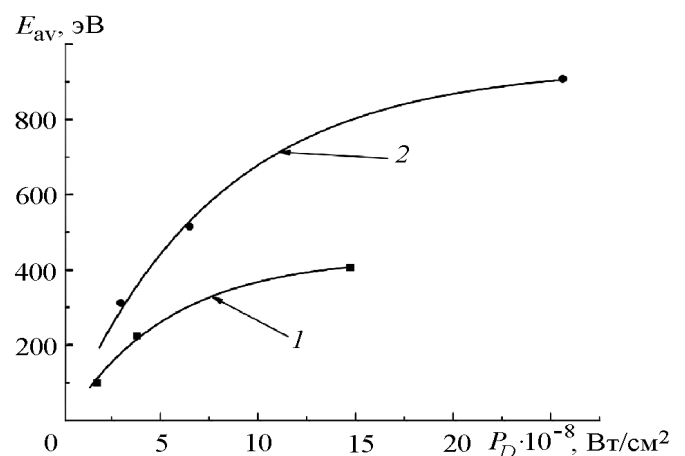


Рис. 3. Зависимость энергии ионов от средней плотности мощности лазерного излучения в алюминиевой (1) и медной (2) плазме

$$E_{av} = \frac{1}{2} \frac{\int_0^{\infty} m[u(t)]^2 i(t) dt}{\int_0^{\infty} i(t) dt} = \frac{mL^2}{2} \frac{\int_0^{\infty} t^{-2} i(t) dt}{\int_0^{\infty} i(t) dt}.$$

Хорошо видно, что для обоих материалов в диапазоне средних плотностей мощности  $(1.8-10) \cdot 10^8$  Вт/см<sup>2</sup> кинетическая энергия частиц в эрозионном факеле растет с увеличением плотности мощности лазерного излучения. При дальнейшем росте плотности мощности зависимость выходит на насыщение, причем для алюминия данный эффект выражен сильнее, чем для меди. Полученный результат хорошо согласуется с данными [7, 8], где также проводились зондовые времяпролетные исследования эрозионного факела, образующегося при испарении алюминиевой и медной мишеней лазерными импульсами наносекундной длительности. Авторы [7] связывают наблюдаемый эффект с поглощением и/или отражением части лазерного излучения ионизованным фронтом эрозионного факела.

На рис. 4 приведены результаты измерения толщин осажденных пленок при различных условиях эксперимента для алюминиевой и медной мишеней. Точки с нулевой толщиной покрытия соответствуют средней плотности мощности лазерного излучения, при которой ни в одной точке поперечного сечения лазерного пятна не достигаются пороговые значения, необходимые для начала интенсивного испарения материала мишени. Несмотря на небольшое количество экспериментальных точек, полученные результаты позволяют предположить, что зависимость скорости осаждения пленок металлов от плотности мощности лазерного излучения, так же как и аналогичная зависимость для средней кинетической энергии частиц в эрозионном факеле, имеет тенденцию к насыщению с ростом плотности мощности.

На рис. 5 приведены микрофотографии алюминиевых пленок, осажденных при различных значениях средней плотности мощности лазерного излучения. Аналогичная картина наблюдается и для медной мишени. На рис. 6 и 7 представлены зависимости общего количества частиц на поверхности пленки и распределения частиц по размерам в алюминиевой и медной мишенях от средней плотности мощности воздействующего лазерного излучения. Из представленных результатов следует, что с ростом средней плотности мощности лазерного излучения наблюдается увеличение как количества, так и размеров капель застывшего металла на поверхности осажденных пленок. Для алюминия и меди при низких плотностях мощности лазерного излучения, близких к пороговым значениям, удается получить пленки, практически не содержащие капельной фазы. По нашим данным "бескапельные" пленки осаждаются в диапазонах средних плотностей мощности лазерного излучения  $(1.6-2) \cdot 10^8$  Вт/см<sup>2</sup> для алюминия и  $(2.6-2.8) \cdot 10^8$  Вт/см<sup>2</sup> для меди. При этих условиях средняя скорость роста пленки составляет 0.4 нм/мин для алюминия и 0.1 нм/мин для меди.

Детальный анализ распределения по размерам капель застывшего металла на поверхности исследованных пленок (рис. 6) показывает, что основная масса частиц имеет размеры в диапазоне 0.1–5 мкм, причем наибольшее количество частиц попадает в диапазон 0.5–1 мкм. Частицы с размером большим 5 мкм встречаются достаточно редко. Частицы с размером меньшим 0.1 мкм на микрофотографиях не зарегистрированы. (рис. 5). Полученные результаты говорят о том, что формирование жидкокапельной фазы в эрозионных факелах метал-

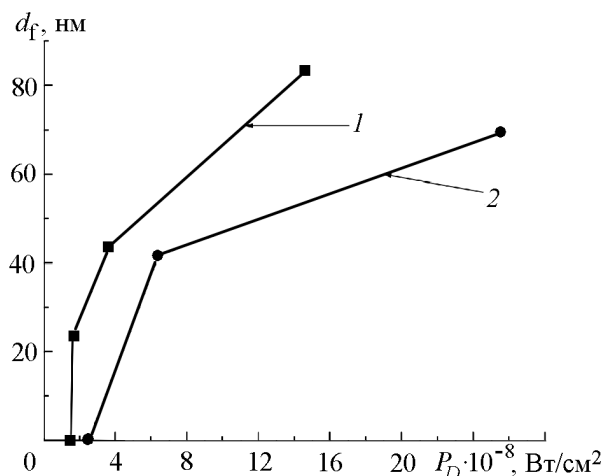


Рис. 4. Зависимость толщины осажденных пленок от средней плотности мощности воздействующего лазерного излучения: 1 — алюминий; 2 — медь

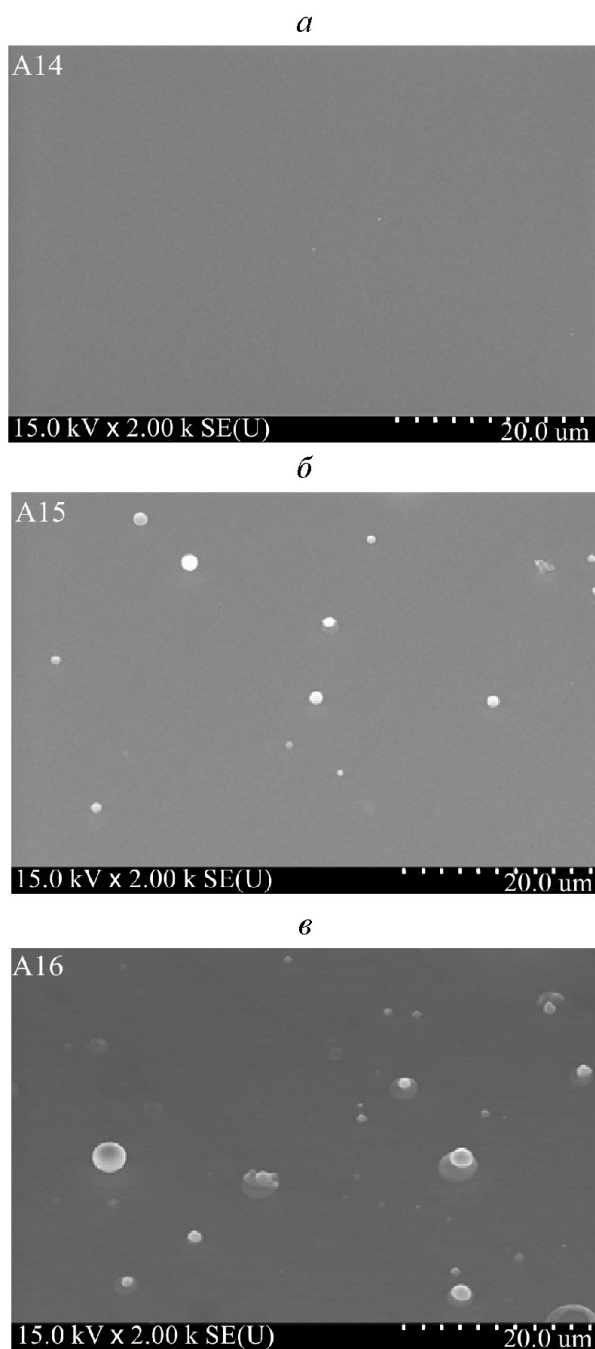


Рис. 5. Изображение поверхности осажденных пленок алюминия при средней плотности мощности воздействующего лазерного излучения  $1.6 \cdot 10^8$  (а),  $3.7 \cdot 10^8$  (б) и  $14.6 \cdot 10^8$  Вт/см<sup>2</sup> (в)

танная спектральная кривая потерь (кривая 4). Как видно из этого рисунка, результаты теоретических расчетов и экспериментальные данные хорошо согласуются. Максимумы зависимостей потерь от длины волны излучения по оси абсцисс совпадают. Таким образом, регистрацию спектров светопропускания можно рассматривать в качестве экспресс-метода контроля качества наноразмерных пленок металлов, осажденных лазерным методом. Согласно нашим данным, пики экстинкции, связанные с дополнительным поглощением за счет плазмонного резонанса, возникают при концентрациях металлических частиц на поверхности осажденной пленки превышающих  $2 \cdot 10^5$  частиц/см<sup>2</sup>.

лов, получаемых в вакууме при воздействии лазерных импульсов наносекундной длительности, происходит преимущественно за счет гидродинамического механизма [1–3]. Механизмы объемного парообразования [4] и конденсации продуктов разрушения [5] играют второстепенную роль. С другой стороны, можно предположить, что наночастицы жидкокапельной фазы материала мишени, формирующиеся в эрозионном факеле за счет указанных механизмов увлекаются потоком ионов и атомов материала мишени и при попадании на поверхность подложки формируют нанопленку. В любом случае, основное влияние на равномерность осаждаемых пленок оказывают частицы, сформированные в эрозионном факеле за счет гидродинамического механизма. Они имеют достаточно крупные размеры (1–15 мкм) и значительно меньшие скорости по сравнению со скоростью атомов и ионов. Эти частицы, достигая поверхности подложки, вызывают существенные нарушения однородности осаждаемого покрытия. Осажденные лазерно-плазменным методом наноразмерные металлические пленки достаточно прозрачны, поэтому представляет интерес исследовать их спектральные характеристики.

На рис. 8 представлены спектральные характеристики коэффициента потерь (экстинкции) при различных условиях осаждения пленок. Из рисунка видно, что максимальные потери наблюдаются у пленок, осажденных при повышенных плотностях мощности воздействующего лазерного излучения. Пленки, осажденные при средних плотностях мощности лазерного излучения вблизи порога испарения материала мишени, обладают высокой прозрачностью в видимой области спектра. На некоторых кривых (кривая 3, на рис. 8, а и кривые 2 и 3, на рис. 8, б) наблюдаются пики экстинкции. Учитывая тот факт, что при больших плотностях мощности воздействующего лазерного излучения на пленках появляется значительное количество металлических частиц, наблюдаемые пики можно объяснить дополнительным поглощением на частицах за счет плазмонного резонанса [9]. Был сделан расчет спектральной оптической плотности исследуемых пленок при наличии на их поверхности медных частиц диаметром 0.5 мкм, поскольку из экспериментальных распределений частиц по размерам (рис. 7) видно, что таких частиц на пленках большинство. На рис. 8, б приведена теоретически рассчитанная

Рис. 6. Зависимость количества частиц на квадратный сантиметр пленки от средней плотности мощности воздействующего лазерного излучения при расстоянии от подложки до мишени 10 см: 1 — алюминий; 2 — медь

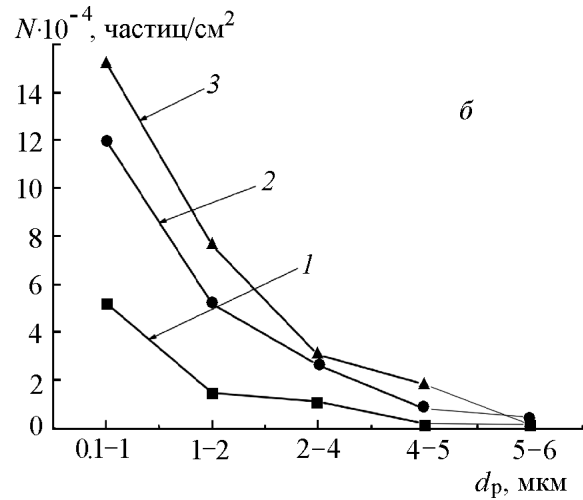
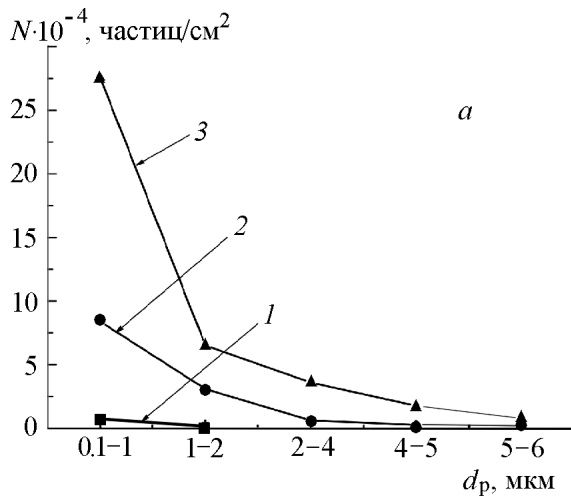
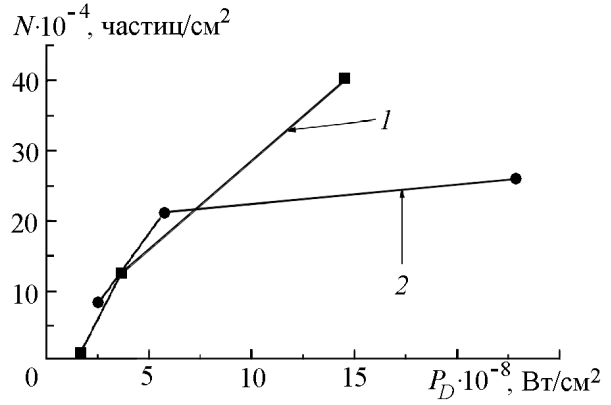


Рис. 7. Распределение частиц по размерам в пленках алюминия (а) и меди (б) при различных средних плотностях мощности воздействующего лазерного излучения: а —  $P_D^{\text{av}} = 1.6 \cdot 10^8$  Вт/см<sup>2</sup> (1),  $3.7 \cdot 10^8$  (2),  $14.6 \cdot 10^8$  (3); б —  $0.3 \cdot 10^9$  (1),  $0.6 \cdot 10^9$  (2),  $2.3 \cdot 10^9$  (3)

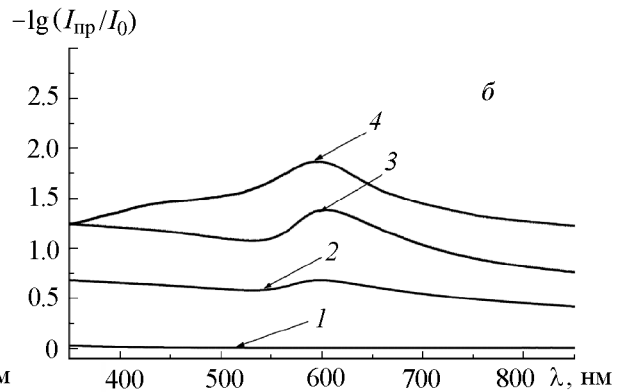
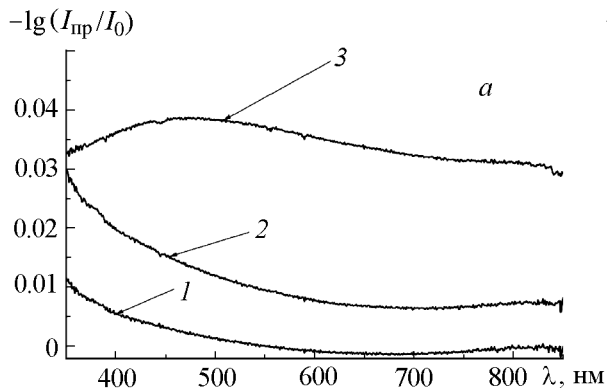


Рис. 8. Спектральная зависимость оптических потерь пленок алюминия (а) и меди (б) при различных средних плотностях мощности лазерного излучения: а —  $P_D^{\text{av}} = 1.6 \cdot 10^8$  Вт/см<sup>2</sup> (1),  $3.7 \cdot 10^8$  (2),  $14.6 \cdot 10^8$  (3); б —  $0.3 \cdot 10^9$  (1),  $0.6 \cdot 10^9$  (2),  $2.3 \cdot 10^9$  (3), теоретически рассчитанные потери излучения для диаметра частиц 0.5 мкм (4)

**Заключение.** Используя комплексную методику контроля параметров эрозионной лазерной плазмы и осажденных металлических пленок, экспериментально определены пороги плотностей мощности воздействующего на металлические мишени лазерного излучения наносекундной длительности, при превышении которых начинается интенсивное испарение лазерной мишени. Показано, что пороговая плотность мощности лазерного излучения составляет  $4.5 \cdot 10^8$  Вт/см<sup>2</sup> для алюминия и  $7.6 \cdot 10^8$  Вт/см<sup>2</sup> для меди. С учетом гауссова распределения энергии по сечению лазерного пучка указанные пороговые значения соответствуют средним значениям плотности мощности  $1.5$  и  $2.5 \cdot 10^8$  Вт/см<sup>2</sup> для алюминия и меди соответственно.

Показано, что для алюминия и меди при низких плотностях мощности лазерного излучения, близких к пороговым значениям, удается получить пленки, практически не содержащие капельной фазы. С ростом плотности мощности лазерного излучения наблюдается увеличение как количества, так и размеров капель застывшего металла на поверхности осажденных пленок.

В спектрах коэффициента потерь (экстинкции) пленок, осажденных при повышенных плотностях мощности воздействующего лазерного излучения и содержащих значительное количество микрокапель застывшего металла (более  $2 \cdot 10^5$  частиц/см<sup>2</sup>), наблюдаются характерные пики экстинкции, которые связаны с дополнительным поглощением на частицах металла за счет плазмонного резонанса. Таким образом, регистрацию спектров светопропускания наноразмерных пленок металлов, осажденных с использованием лазерного излучения следует рассматривать как экспресс-метод контроля качества таких пленок.

Полученные результаты имеют важное значение для развития технологии импульсного лазерного осаждения тонких металлических пленок.

### Обозначения

$P_D$  — плотность мощности лазерного излучения, Вт/см<sup>2</sup>;  $P_D^{\text{th}}$  и  $P_D^{\text{av}}$  — пороговая и средняя плотности мощности лазерного излучения, Вт/см<sup>2</sup>;  $d$  — диаметр пучка лазерного излучения, мм;  $d_p$  — диаметр частиц, мкм;  $d_f$  — толщина пленки, нм;  $E_{\text{av}}$  — средняя кинетическая энергия ионов, эВ;  $i(t)$  — ионный ток через зонд, отн. ед.;  $I_0$  и  $I_{\text{пр}}$  — интенсивности падающего на образец и прошедшего через него излучения, отн. ед.;  $L$  — расстояние между мишенью и зондом (подложкой), см;  $l$  — радиальная координата, мм;  $m$  — масса ионов, кг;  $t$  — время пролета, мкс;  $u(t) = L/t$  — скорость ионов, м/с;  $N$  — количество частиц;  $\lambda$  — длина волны лазерного излучения, нм. Индексы: av — средний; th — пороговый; p — частица; f — пленка; пр — прошедший.

### Литература

1. Уляков П. И. Некоторые закономерности разрушения твердых сред излучением ОКГ. *Журн. электротехн. физики*. 1967. Т. 52. Вып. 3. С. 820–831.
2. Путренко О. И., Янковский А. А. Исследование световой эрозии металлов в течение импульса генерации ОКГ. *Журн. прикл. спектроскопии*. 1971. Т. 15, № 4. С. 596–604.
3. Анисимов С. И., Имас Я. А., Романов Г. С., Ходыко Ю. В. *Действие лазерного излучения большой мощности на металлы*. Москва: Наука, 1970.
4. Гончаров В. К. Воздействие на металлы высокоэнергетичных импульсов излучения неодимового лазера различной пространственно-временной формы. *Инженерно-физический журнал*. 2001. Т. 74, № 5. С. 87–97.
5. Гончаров В. К., Козадаев К. В. Формирование конденсированной фазы металлов при воздействии на них субмикросекундных лазерных импульсов. *Инженерно-физический журнал*. 2010. Т. 83, № 1. С. 80–84.
6. Bulgakova N. M., Bulgakov A. V., and Bobrenok O. F. Double layer effects in laser-ablation plasma plumes. *Physics Review E*. 2000. Vol. 62, No. 4. Pp. 5624–5635.
7. Amoroso S., Armenante M., Berardi V., et al. Absorption and saturation mechanisms in aluminium laser ablated plasmas. *Appl. Phys.* 1997. A 65. Pp. 265–271.
8. Jordan R., Cole D., Lunney J. G., et al. Pulsed laser ablation of copper. *Appl. Surface Sci.* 1995. Vol. 86. Pp. 24–28.
9. Гончаров В. К., Козадаев К. В., Попечниц В. И., Пузырев М. В. Комплексная методика контроля характеристик водных суспензий наночастиц металлов. *Журн. прикл. спектроскопии*. 2008. Т. 75, № 6. С. 896–901.