

## Нарушение адгезии при абляции тонких пленок импульсным лазерным излучением

А.В.Феденев, Е.И.Липатов, В.Ф.Тарасенко, В.М.Орловский,  
М.А.Шулепов, Н.Н.Коваль, И.М.Гончаренко

*Исследована зависимость воздействия импульсного лазерного излучения ИК и УФ диапазонов на тонкие металлические и композиционные пленки на стеклянной подложке от плотности энергии. При неоднородном распределении плотности энергии по сечению лазерного пучка и длительности импульса излучения ~300 нс на поверхности пленки можно выделить характерные области, размеры которых коррелируют с распределением энергии в пучке и соответствуют режимам испарения, плавления и разрушения под действием термических напряжений. При длительности импульса ~20 нс и однородном распределении плотности энергии по сечению лазерного пучка обнаружено нарушение адгезии металлических и композиционных пленок к стеклу вследствие возникающих термических напряжений без плавления подложки. Определены пороговые плотности энергии лазерного излучения, необходимые для нарушения адгезии пленок титана, нитрида титана, циркония, ниобия и нержавеющей стали на стеклянных подложках. Численные оценки температуры поверхности и термических напряжений, вызванных нагревом, показали, что на преодоление адгезии пленки к подложке расходуется незначительная часть энергии, большая часть энергии термических напряжений идет на возникновение трещин и в кинетическую энергию вылетевших осколков пленки. Предлагается использовать импульсное лазерное излучение для грубой оценки адгезии металлических и композиционных пленок на стеклянной подложке.*

**Ключевые слова:** тонкие пленки, адгезия, лазерное излучение, абляция, термоиндуцированные напряжения.

### 1. Введение

Абляция тонких пленок на различных подложках лазерным излучением, в том числе излучением эксимерных лазеров с разными длинами волн, плотностью энергии и длительностью импульса, интенсивно исследуется последние несколько лет [1–5]. Это связано с возможностью применения данного процесса в производстве печатных схем с высокой плотностью монтажа, масок для фотолитографии и т. д. Перечислим основные направления, в которых ведутся исследования. Это определение механизмов, приводящих к абляции тонких пленок под действием импульсного лазерного излучения, определение скорости абляции в зависимости от параметров пленки, подложки и лазерного импульса, улучшение качества абляции (четкость краев, максимальное удаление материала пленки и т. д.), построение теоретических моделей, в которых максимально учитываются процессы, происходящие при абляции тонких пленок.

Значительное число работ посвящено исследованию механизмов абляции тонких пленок лазерным излучением. В зависимости от условий проведения эксперимента (плотность мощности и длительность лазерного излучения), а также способов регистрации процессов исследователи предлагают три различных механизма абля-

ции. Это – испарение тонкой пленки при нагреве лазерным излучением (см. обзор в [6]), взрывное удаление пленки благодаря резкому повышению давления газа, возникающему на границе пленка – подложка [7], и двухфазное удаление пленки, состоящее из испарения материала с поверхности и вытеснения жидкости давлением паров [6, 8]. Двухфазный механизм удаления пленок был предложен при исследованиях гидродинамического движения расплава металла пленки во время процесса абляции, при этом для измерения длительности существования расплава использовался как метод скоростной съемки [8], так и метод диагностики отражения и рассеяния лазерного луча [9].

Скорость абляции тонких пленок исследовалась по оценке количества удаленного материала путем измерения объема кратера по СЭМ-изображению [10] или в экспериментах с микровесами [11]. Полученные данные сравнивались с результатами теоретического моделирования. При простейшем моделировании процессов удаления тонких пленок лазерным излучением для определения распределения температуры в пленке и подложке и нахождения скорости абляции использовались одномерные уравнения теплопроводности.

В работе [2] было сделано предположение, что абляцию тонких пленок лазерным излучением нельзя описать одним механизмом, а необходимо учитывать комбинацию процессов: испарение пленки, движение (вытеснение) жидкости под действием давления паров материала над поверхностью, давление газов на границе пленка – подложка и термические напряжения, приводящие к отслоению пленки.

Наиболее развитая теоретическая модель процессов абляции тонких пленок была опубликована сравнитель-

А.В.Феденев, Е.И.Липатов, В.Ф.Тарасенко, В.М.Орловский, М.А.Шулепов, Н.Н.Коваль, И.М.Гончаренко. Институт сильноточной электроники СО РАН, Россия, 634055 Томск, просп. Академический, 2/3; тел.: (3822) 49 16 85, (3822) 49 23 92, факс: (3822) 25 94 10; e-mail: VFT@loi.hcei.tsc.ru

но недавно [12]. В этой модели использовано двумерное осесимметричное приближение и учтены следующие процессы: изменение температуры электронов и атомного остова и их взаимовлияние, взрывная сила, возникающая при коротком импульсе лазерного воздействия из-за большого градиента температуры электронов [13], взаимовлияние температуры атомного остова и скорости его деформации, возникновение волны термических напряжений в пленке. При этом используется допущение, что пленка обладает полной адгезией к подложке, а величина адгезии не меняется во время лазерного импульса и постоянна по поверхности.

Автор работы [14] обратил внимание на то, что для правильного учета теплового контакта пленка – подложка необходимо принять во внимание адгезию пленки к подложке и ее неоднородное распределение по поверхности. Он указал также на возможность постановки обратной задачи – об определении адгезии пленки по результату воздействия лазерного импульса.

Цель настоящей работы заключалась в исследовании механизмов нарушения адгезии при абляции тонких пленок импульсным ИК и УФ лазерным излучением. Было показано, что существует область плотностей энергии лазерного излучения, в которой фазовых переходов в материале пленки не происходит, но вследствие возникновения термических напряжений на границе пленка – подложка осуществляется эффективная абляция пленок. В данной работе продолжена серия экспериментов, начатых в [15–18].

## 2. Экспериментальное оборудование

В экспериментах использовались три лазерных установки. Основу установки № 1 составлял электроразрядный лазер с предыонизацией пучком электронов [19]. Активный объем  $72 \times 3 \times 2.4$  см был ограничен медным электродом и стальной сеткой для защиты фольги выходного окна ускорителя. Ускоритель создавал пучок электронов с длительностью 4 нс и полным током за фольгой 6 кА при средней энергии электронов 150 кэВ. Батарея конденсаторов общей емкостью 0.2 мкФ, расположенная непосредственно в газовой кювете, заряжалась до 10–12 кВ. Резонатор состоял из плоскопараллельного зеркала с алюминиевым покрытием и пластины из КРС5 в качестве выходного окна. Плоскопараллельный резонатор обеспечивал расходимость лазерного излучения в дальней зоне, равную 1.6 мрад. Системы охлаждения выходного фольгового окна ускорителя водой и циркуляции газовой смеси (скорость до  $10 \text{ м}\cdot\text{с}^{-1}$ ) позволяли лазеру работать с частотами следования импульсов до 50 Гц. При использовании смеси  $\text{Ar}:\text{Xe} = 100:1$  с давлением  $p = 1$  атм основная часть энергии лазера излучалась на длине волны  $\lambda = 1.73$  мкм. Лазер обеспечивал энергию в импульсе 10–15 мДж при длительности  $\tau \sim 320$  нс и средней мощности 70 и 300 мВт при частотах повторения импульсов 10 и 25 Гц соответственно.

Установка № 2 представляла собой широкоапертурный лазер (диаметр выходного окна 20 см) с накачкой радиально-сходящимся пучком электронов [19]. При использовании смеси  $\text{Ar}:\text{Xe} = 100:1$  с  $p = 2.5$  атм (основная длина волны генерации 1.7 мкм) и плоскопараллельного резонатора, образованного зеркалом с алюминиевым покрытием и кварцевой пластиной, энергия лазерного излучения на поверхности мишени после фокуси-

ровки оптической системой, состоящей из трех кварцевых линз, в пятно диаметром 5 мм составляла 5 Дж ( $\tau = 400$  нс).

Универсальный электроразрядный лазер «Фотон-2» [20] с энергией излучения до 150 мДж и  $\lambda = 308$  нм использовался в качестве установки № 3. В экспериментах применялся неустойчивый конфокальный резонатор, обеспечивающий расходимость излучения 1.5 мрад. Длительность импульса лазерного излучения составляла 20 нс на полувысоте.

Энергия лазерного излучения измерялась с помощью калориметра ИМО-2Н и пироэлектрического датчика PE-25 (OPHIR Opt.), калиброванного в используемом оптическом диапазоне с точностью 5%. Для исследования свойств облучаемых поверхностей использовались оптические микроскопы МБС-100 ( $100\times$ ) и ММР-4 ( $1500\times$ ), микроинтерферометр МИИ-4, трехмерный бесконтактный профилометр Micro Measure 3D Station (CSEM), а также прибор для исследования адгезионных свойств покрытий CSEM Micro-Scratch Tester MST-S-AX-000.

## 3. Экспериментальные результаты и их обсуждение

Облучению подвергались пленки из нержавеющей стали, циркония, ниобия, титана и нитрида титана, нанесенные на стеклянную подложку по технологии плазменно-ассистированного вакуумно-дугового напыления [21]. Для увеличения адгезии покрытия поверхность образцов, помещенных в вакуумную камеру, предварительно очищалась в аргоновой плазме несамостоятельного дугового разряда без катодного пятна при низком ( $p \sim 10^{-3}$  Тор) давлении рабочего газа и  $I = 60$  А [22]. Толщина пленки составляла 300–1000 нм.

Установка № 1 (импульсный Хе-лазер) использовалась для облучения пленки ниобия толщиной  $\sim 1$  мкм на стекле (толщина стеклянной подложки 5 мм). Путем изменения расстояния до линзы из ВаF ( $F = 123$  мм) изменялась плотность мощности излучения на поверхности мишени. Диаметр пятна в фокусе составлял  $\sim 300$  мкм, максимальная плотность энергии излучения в фокальном пятне была равна  $\sim 20$  Дж·см $^{-2}$ . Эксперименты проводились на воздухе при перпендикулярном падении луча на обрабатываемую поверхность. Зависимости площади повреждения поверхности от расстояния до линзы для случаев прямого и непрямого (сквозь стекло) воздействия приведены на рис. 1.

При прохождении излучения сквозь стекло площадь пятна излучения на выходе увеличивается и, кроме того,  $\sim 30\%$  энергии поглощается стеклянной подложкой, однако в этом случае область разрушения покрытия при тех же расстояниях до линзы больше, чем при прямом воздействии. Следует отметить три характерные точки на кривых рис. 1. В области перед первой точкой (при расстояниях, близких к фокусному) происходит преимущественно испарение покрытия и деформация (растрескивание) стеклянной подложки (площадь зоны испарения максимальна). Во второй области, в которой основным процессом является плавление металла, наблюдается образование «валика» из свернувшейся пленки на краю зоны воздействия. А в третьей области, максимально удаленной от фокуса, где еще есть видимые повреждения покрытия, плотности энергии хватает только на появление

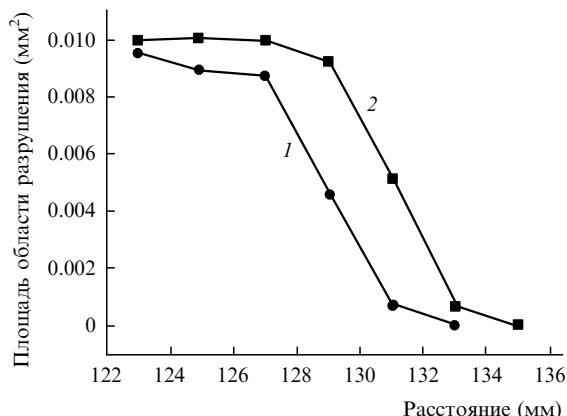


Рис. 1. Зависимости площади области разрушения от расстояния до линзы в случае прямого (1) и непрямого (сквозь стеклянную подложку) (2) облучения ниобиевой пленки толщиной 1 мкм излучением Хе-лазера (установка № 1).

трещин в покрытии и его «отшелушивание». Первые два процесса (испарение и плавление) носят пороговый характер по температуре, что и обуславливает существование точек перегиба на кривых.

На том же образце эксперименты проводились с использованием излучения Хе-лазера (установка № 2) при плотности энергии на поверхности мишени  $\sim 20$  Дж·см $^{-2}$  и диаметре пятна в фокальной плоскости  $\sim 5$  мм. На рис. 2 приведена микрофотография части автографа лазерного излучения на пленке ниобия, а также отдельные характерные зоны пятна с большим увеличением. В центральной зоне (рис. 2, а) металлическая пленка полностью удалена, а поверхность стекла покрыта мелкими трещинами. По мере удаления от центра можно выделить еще три основные зоны, различающиеся размерами и характером повреждения поверхности. Во второй зоне поверхность стеклянной подложки также растрескана и

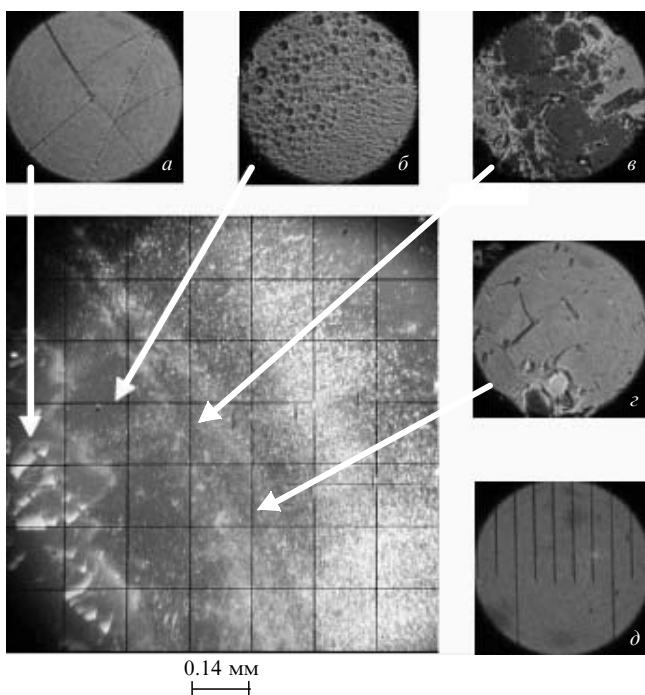


Рис. 2. Микроснимок поверхности ниобиевой пленки, осажденной на стеклянную подложку, после облучения Хе-лазером (установка № 2). Зоны разрушения: а – центральная, б – вторая, в – третья, г – четвертая, д – масштаб (расстояние между штрихами 10 мкм).

6 Квантовая электроника, т. 34, № 4

покрыта вплавленными в стекло каплями металла микроскопических размеров (рис. 2, б). Разрозненные участки металлической пленки с неровными оплавленными краями характерны для третьей зоны, в данном случае стеклянная поверхность не повреждена (рис. 2, в). В четвертой зоне металлическая пленка потрескана и местами отколота от подложки (рис. 2, г). На периферии зоны лазерного облучения поверхность пленки ниобия покрыта брызгами металла и окислов, вынесенных из зоны воздействия. Совокупная ширина второй, третьей и четвертой зон составляет примерно 20 % радиуса пятна. Подобные характерные зоны повреждений были обнаружены и при облучении пленки из нержавеющей стали на стекле. Ее отличие от пленки ниобия заключается в том, что в центральной зоне существуют участки поверхности, покрытые «морозным узором» вплавленных в стекло кристаллов. Для определения природы этих кристаллов требуется проведение дополнительных экспериментов.

Для выяснения процессов, приводящих к данной картине разрушения, нами были измерены распределения плотности выходной энергии излучения Хе-лазера (установка № 2) по апертуре выходного окна (рис. 3). Для этого использовался пироэлектрический датчик РЕ-25 с диафрагмой 8 мм, измерения проводились с шагом 1 см. Диаметр выходного окна лазера совпадает с диаметром лазерной камеры, стенками которой является раздельная фольга диода. Для обеспечения максимальной суммарной выходной энергии генерации и ее однородности по апертуре плотность и начальная энергия электронов должны быть достаточно высокими, что, как было показано нами ранее [23], приводит к неоптимальному режиму накачки вблизи фольги. Этим объясняется уменьшение плотности энергии генерации при удалении от оси более чем на 8 см (рис. 3). Отношение размеров центральной области к размерам области спада выходной энергии лазера совпадает с отношением размеров центральной зоны пятна к суммарным размерам зон 2–4.

В случае использования электроразрядного УФ лазера наносекундной длительности (установка № 3) с однородным распределением энергии по апертуре при последовательном изменении плотности энергии в плоскости мишени были получены режимы воздействия, когда все пятно имеет вид, характерный для выделенных зон 2–4 (рис. 2, б–г). На рис. 4 приведены микрофотографии отпечатков излучения ХеСI-лазера на поверхности пленки из нержавеющей стали толщиной 1 мкм, напыленной на

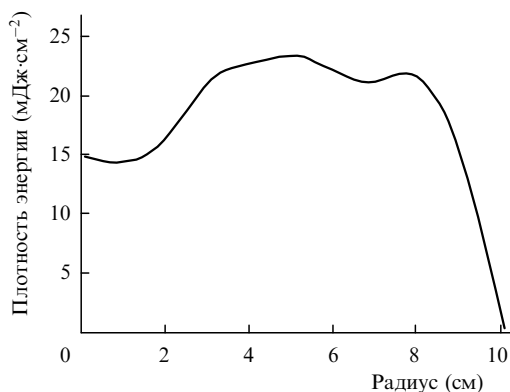


Рис. 3. Распределение плотности энергии по апертуре Хе-лазера (установка № 2).

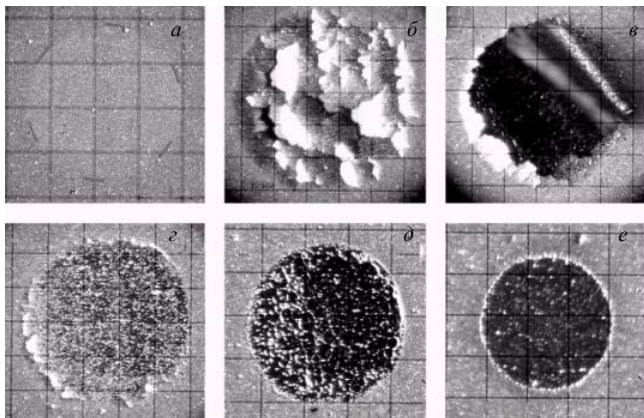


Рис.4. Микроснимки поверхности пленки из нержавеющей стали, осажденной на стеклянную подложку, после облучения ХеСI-лазером (установка № 3) при плотности энергии  $E = 0.44$  (а), 1.06 (б), 1.26 (в), 1.58 (г), 2.7 (д) и 9.5 Дж·см<sup>-2</sup> (е). Масштаб сетки равен 0.5 (а), 0.25 (б–д) и 0.14 мм (е).

стеклянную подложку. При плотности энергии на поверхности пленки до 0.66 Дж·см<sup>-2</sup> последняя лишь немного изменяет контраст (рис.4,а). В случае превышения плотности энергии указанного значения пленка растрескивается и отшелушивается сначала на дефектах покрытия, а затем по всей площади воздействия лазерного излучения (рис.4,б). При этом разрушения поверхности стеклянной подложки в зоне облучения не наблюдается. Возможен даже полный отрыв пленки от подложки (рис.4,в).

Дальнейшее увеличение плотности энергии (более 1.5 Дж·см<sup>-2</sup>) приводит к исчезновению трещин на поверхности пленки. Это говорит о том, что температура поверхности превышает температуру порога пластических деформаций, возникающих в результате нагрева лазерным излучением (рис.4,г). При этом пленка отслаивается от подложки только на краю пятна, там, где имеет место спад плотности энергии излучения. Дальнейший рост плотности энергии приводит к плавлению и испарению пленки (рис.4,д). И наконец, при плотности энергии свыше 3.6 Дж·см<sup>-2</sup> металлическое покрытие на всей поверхности воздействия испаряется (рис.4,е), причем поверхность стеклянной подложки может покрываться трещинами. Пороговые плотности энергии, необходимые для разрушения пленок титана, нитрида титана, циркония, ниобия и нержавеющей стали на стеклянных подложках под действием лазерно-индуцированных термических напряжений, приведены в табл.1. Отметим, что разрушить адгезию медной пленки к кварцевой подложке излучением ХеСI-лазера удалось только при облучении сквозь подложку.

На рис.5 приведено изображение поверхности пленки Тi (толщиной 1 мкм) на стеклянной подложке после облучения ХеСI-лазером в припороговом режиме (без плавления пленки), полученное с помощью трехмерного

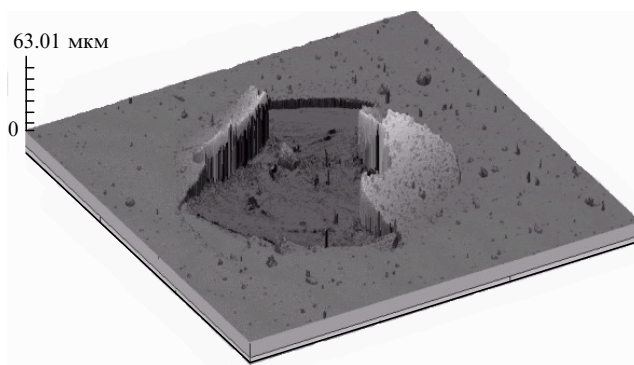


Рис.5. Трехмерное изображение поверхности пленки Тi толщиной 1 мкм на стеклянной подложке (1.5 × 1.5 мм) после облучения ХеСI-лазером в режиме нарушения адгезии.

бесконтактного профилометра Micro Measure 3D Station. Видно, что в центральной части пятна, подвергшегося воздействию лазерного излучения, пленка титана отсутствует, а в области границы зоны облучения она отделена от подложки и ее края подняты вверх почти на 40 мкм. Отметим отсутствие валика расплава на краях пленки, характерного для режима абляции с плавлением пленки и участием сил поверхностного натяжения жидкого расплава.

Процесс абляции тонких пленок нитрида титана под действием импульсного лазерного излучения в режимах без фазовых переходов подробно рассмотрен в работах [3, 4, 24]. Использование методик микрофотографирования с высоким (5 нс) временным разрешением позволило показать, что при импульсном нагреве ( $\tau = 1$  нс или 110 нс) происходит следующее. Локальный (в области пятна лазерного излучения) нагрев поверхности пленки с ее последующим термическим расширением и возникновением термоиндуцированных радиальных напряжений между нагретой пленкой и окружающей ее холодной частью приводит к отрыву пленки от подложки в момент, когда напряжения превышают адгезию. В области воздействия лазерного излучения пленка вспучивается, и если термические напряжения превышают критическое значение, она растрескивается, а часть осколков разлетается. По оценкам авторов [4, 24], до 80 % энергии термических напряжений переходит в кинетическую энергию осколков, при этом максимальные скорости осколков, измеренные в экспериментах, достигают 110 м·с<sup>-1</sup>.

#### 4. Моделирование процесса абляции тонких пленок лазерным излучением в припороговых условиях облучения

Для оценки температуры тонкой пленки и возникающих в ней термических напряжений воспользуемся простой моделью, которая включает в себя следующие допущения.

1. Поскольку разрушение адгезии пленки к подложке в наших экспериментах с УФ лазером в пороговых режимах проходило без плавления поверхности, в расчетах можно пренебречь изменением теплоемкости пленки (фазовыми переходами).

2. Используется одномерная модель, т.к. диаметр пятна лазерного облучения на поверхности намного превышает глубину проникновения тепла за время импульса.

Табл.1. Пороговая плотность энергии лазерного излучения (Дж·см<sup>-2</sup>), необходимая для удаления пленки с подложки.

Толщина покрытия (мкм)	Нержавеющая сталь	Nb	Ti	TiN	Zr
1	0.66 ± 0.03	0.52 ± 0.03	1.18 ± 0.06	0.43 ± 0.02	1.28 ± 0.06
0.3	–	0.31 ± 0.02	0.51 ± 0.03	0.22 ± 0.01	0.51 ± 0.03

3. При длительности фронта импульса лазерного излучения 10–12 нс глубина проникновения сопоставима с толщиной пленки, поэтому для оценки максимальной температуры поверхности и соответствующих термических напряжений можно пренебречь влиянием подложки, считая материал однородным по глубине. Отметим, что это несколько занижает оценку температуры по сравнению с реальной.

4. Считаем, что коэффициенты упругости не зависят от температуры и соответствуют значениям для объемных материалов.

Воспользуемся решением уравнения теплопроводности для случая гауссова распределения плотности мощности излучения (подробнее см. в [25]):

$$q(x, t) = q_0(t) \exp\left(-\frac{x^2}{r^2}\right), \quad (1)$$

где  $q_0(t)$  – временная зависимость мощности лазерного излучения;  $r$  – радиус пятна на облучаемой поверхности.

Для этого случая выведена формула зависимости температуры от времени и координат ( $z$  – глубина, отсчитываемая от поверхности;  $x$  – радиальное расстояние от оси лазерного пучка):

$$T(z, x, t) = \frac{q_{\max} r^2}{K} \left(\frac{a}{\pi}\right)^{1/2} \times \int_0^t \frac{P(t-t') dt' \exp[-z^2/(4at) - x^2/(4at')]}{\sqrt{t'(4at' + r^2)}}, \quad (2)$$

где  $q_{\max}$  – максимальная плотность мощности излучения в центре пятна;  $K$  – теплопроводность материала пленки;

$a = K/\rho C$  – температуропроводность материала пленки;  $\rho$  и  $C$  – плотность и теплоемкость вещества;  $P(t) = q_0(t)/q_{\max}$ . При расчетах было принято, что для всех исследуемых металлов коэффициент поглощения энергии лазерного излучения материалом  $k = 0.5$ .

Термические напряжения, возникающие при расширении закрепленной по краям на поверхности подложки тонкой пленки, можно записать как [26]

$$\sigma(T) = \frac{\alpha(T - T_0)E}{1 - \mu}, \quad (3)$$

где  $\alpha$ ,  $E$ ,  $\mu$  – коэффициент линейного теплового расширения, модуль Юнга и коэффициент Пуассона материала пленки соответственно.

Расчеты проводились для пленок ниобия, титана и нержавеющей стали толщиной 1 мкм на стеклянной подложке, облучаемых импульсом излучения ХеСl-лазера длительностью 20 нс. Расчетные значения температуры поверхности исследованных пленок и термических напряжений, возникающих в них, приведены в табл.2. Отметим, что используемые коэффициенты поглощения лазерного излучения ( $k = 0.5$  для всех пленок) отличаются от реальных и не учитывают их изменение с температурой. Там же приведены физические величины для этих пленок [27], адгезия, измеренная методом скрэтч-теста, и указана доля энергии напряжений, идущая на ее преодоление.

В случае тонких пленок (0.3 мкм) расчеты не проводились, т. к. глубина проникновения теплового потока за время импульса существенно превышала толщину пленки и было необходимо использовать численный метод

Табл.2. Характеристики материалов пленок, измеренные величины адгезии и расчетные оценки лазерно-индуцированных напряжений и температуры поверхности (коэффициент поглощения  $k = 0.5$ ).

Характеристики	Ниобий		Титан		Нержавеющая сталь	Примечание
	1 мкм	0.3 мкм	1 мкм	0.3 мкм		
$T_m$ (°C)	2448.2		1648		1380	
$T_{ev}$ (°C)	4738		3265			
Теплоемкость $C_p$ (Дж·кг <sup>-1</sup> ·К <sup>-1</sup> )	269.4		523		460	
Теплопроводность $K$ (Вт·м <sup>-1</sup> ·К <sup>-1</sup> )	53		22.065		45.4	
Плотность $\rho$ (кг·м <sup>-3</sup> )	8570		4500		7800	Справочные данные [27]
Температуропроводность $a$ (см <sup>2</sup> ·с <sup>-1</sup> )	0.23		0.0938		0.1265	
Коэффициент линейного теплового расширения $\alpha$ (10 <sup>-6</sup> ·К <sup>-1</sup> )	7.64		10.1		11.9	
Коэффициент Пуассона $\mu$	0.397		0.361		0.27	
Модуль Юнга $E$ (10 <sup>10</sup> Па)	15.6		10.84		20	
Пороговая плотность мощности $W_{\max}$ (МВт·см <sup>-2</sup> )	26 ± 0.2	15.4 ± 0.2	59.6 ± 1.9	25.8 ± 0.3	33.5 ± 0.2	
Пороговая плотность энергии $Q_{\max}$ (Дж·см <sup>-2</sup> )	0.519 ± 0.025	0.305 ± 0.016	1.18 ± 0.06	0.512 ± 0.026	0.664 ± 0.033	Эксперимент
Радиус пятна $r$ (см)	0.087 ± 0.004	0.113 ± 0.006	0.058 ± 0.003	0.087 ± 0.004	0.089 ± 0.004	
Измеренная адгезия (кг·см <sup>-2</sup> )	2.63	3.04	3.56	2.75	2.58	
Максимальная температура на поверхности $T_{\max}$ (°C)	1170	–	4100*	–	1300	
Термические напряжения $\sigma$ (10 <sup>3</sup> кг·см <sup>-2</sup> )	23	–	72	–	43	Расчет
Доля энергии напряжений, идущая на преодоление адгезии (%)	0.011	–	0.005	–	0.006	

\* Данная температура превышает температуру плавления.

решения уравнения теплопроводности. Температура поверхности, рассчитанная для пленки титана, превышает температуру кипения, что не соответствует экспериментальным результатам (плавления пленки в припороговых условиях облучения не наблюдалось). Согласно расчетам доля энергии термических напряжений, расходуемая на преодоление адгезии, очень невелика (порядка сотых долей процента). Остальная часть энергии расходуется на создание трещин в пленке и кинетическую энергию обломков. Теми же причинами объясняется отсутствие явной зависимости между измеренной адгезией и термическими напряжениями, рассчитанными для разных пленок (см. табл.2).

## 5. Заключение

Получены экспериментальные данные, характеризующие разрушение тонких (0.3–1 мкм) металлических и композиционных пленок на стеклянной подложке под действием импульсного лазерного излучения ИК и УФ диапазонов. Показано, что при сравнительно больших длительностях импульса излучения (300 нс) и неоднородном распределении плотности мощности по сечению лазерного пучка в зоне разрушения тонкой пленки можно выделить характерные области, размеры которых коррелируют с распределением энергии в пучке и соответствуют режимам испарения, плавления и разрушения под действием термических напряжений. В области между зоной плавления и зоной термических напряжений наблюдается образование «валика» из пленки, что указывает на необходимость учета сил поверхностного натяжения жидкости при неполном (по глубине) расплавлении металлической пленки.

При уменьшении длительности импульса до 10–20 нс и однородном распределении плотности мощности по сечению лазерного пучка обнаружены режимы нарушения адгезии металлических и композиционных пленок к стеклянной подложке без плавления поверхности пленки, а только за счет возникающих термических напряжений. Определены пороговые плотности энергии лазерного излучения нарушения адгезии пленок титана, нитрида титана, циркония, ниобия и нержавеющей стали на стеклянных подложках.

Оценка значений температуры поверхности, а также возникающих в пленке термических напряжений и сравнение этих величин с полученными экспериментально значениями показали, что на преодоление адгезии пленки к подложке расходуется незначительная часть энергии, большая часть термических напряжений идет на создание трещин и кинетическую энергию вылетевших осколков пленки. Это позволяет использовать лазерное излучение только для грубого (порогового) определения адгезии металлических и композиционных пленок на стеклянной подложке. Для точного нахождения адгезии описанным методом (в режиме разрушения пленок ла-

зерно-индуцированными термическими напряжениями) необходимо использовать более точные методы определения энергетического порога нарушения адгезии пленки, например интерференционные или акустические.

1. Lee S.K., Na S.J. *Appl. Phys. A*, **68**, 417 (1999).
2. Dowling A.J., Ghantasala M.K., Hayes J.P., Harvey E.C., Doyle E.D. *Smart Mater. Struct.*, **11**, 715 (2002).
3. Koulikov S.G., Dlott D.D. *Optics and Photonics News* (June), p.27 (2000).
4. Dlott D.D. *Appl. Surf. Sci.*, **197–198**, 3 (2002).
5. Yakovlev V.V., Magyar J., Aita C.R., Sklyarov A., Mikaylichenko K. *Proc. SPIE Int. Soc. Opt. Eng.*, **4274**, 212 (2001).
6. Veiko V.P., Metev S.M., Kaidanov A.I., Libenson M.N., Jakovlev E.B. *J. Phys. D*, **13**, 1565 (1980); Veiko V.P., Metev S.M., Stamenov K.V., Kalev H.A., Jurkevich B.M., Karpman I.M. *J. Phys. D*, **13**, 1571 (1980).
7. Andrew J.E., Dyer P.E., Greenough R.D., Key P.H. *Appl. Phys. Lett.*, **43**, 1076 (1983).
8. Toth Z., Hopp B., Kantor Z., Ignacz F., Szarenyi T., Bor Z. *Appl. Phys. A*, **60**, 431 (1995).
9. Miyamoto I., Hayashi H. *Abstr. ICALEO'95* (San Diego, CA, 1995, p.391).
10. Schmatjko K.J., Durchholz H., Enders G. *Proc. SPIE Int. Soc. Opt. Eng.*, **1023**, 194 (1988).
11. Zhang X., Chu S.S., Ho J.R., Grigoropoulos C.P. *Appl. Phys. A*, **64**, 545 (1997).
12. Chen J.K., Beraun J.E., Tham C.L. *J. Opt. A*, **4**, 650 (2002).
13. Falkovsky L.A., Mishchenko E.G. *J. Exp. Theor. Phys.*, **88**, 84 (1999).
14. Яковлев Е.Б. *Квантовая электроника*, **8**, 1073 (1981).
15. Fedenev A.V., Alekseev S.B., Goncharenko I.M., Koval' N.N., Lipatov E.I., Orlovskii V.M., Tarasenko V.F., Shulepov M.A., Oskomov K.V., Sochugov N.S. *Proc. LAT'02* (Moscow, 2002, p.254).
16. Tarasenko V.F., Fedenev A.V., Goncharenko I.M., Koval' N.N., Lipatov E.I., Orlovskii V.M., Shulepov M.A. *Proc. of the XXI Int. Symp. on the Physics of Ionized Gases* (Nis, Yugoslavia, 2002, p.266).
17. Lipatov E.I., Fedenev A.V., Alekseev S.B., Goncharenko I.M., Koval' N.N., Orlovskii V.M., Tarasenko V.F., Shulepov M.A. *Proc. of the VI Int. Conf on Modification of Materials with Particle Beams and Plasma Flows* (Tomsk, Russia, 2002, p.484).
18. Липатов Е.И., Феденев А.В., Алексеев С.В., Гончаренко И.М., Коваль Н.Н., Орловский В.М., Тарасенко В.Ф., Шулепов М.А. *Тез. лекций и докл. VIII междунар. школы-семинара по люминесценции и лазерной физике* (Иркутск, Россия, 2002, с.58).
19. Tarasenko V.F., Baksht E.H., Fedenev A.V., Orlovskii V.M., Panchenko A.N., Skakun V.S., Sosnin E.A. *Proc. SPIE Int. Soc. Opt. Eng.*, **3343**, 715 (1998).
20. Верховский В.С., Ломаев М.И., Панченко А.Н., Тарасенко В.Ф. *Квантовая электроника*, **22**, 9 (1995).
21. Schanin P.M., Koval' N.N., Kozyrev A.V., Goncharenko I.M., Grigoriev S.V., Tolkachev V.S. *J. Tech. Phys.*, **41**, 177 (2000).
22. Винтизенко Л.Г., Григорьев С.В., Коваль Н.Н., Толкачев В.С., Лопатин И.В., Щанин П.М. *Изв. вузов. Сер. Физика*, **44**, 28 (2001).
23. Феденев А.В., Тарасенко В.Ф., Скакун В.С. *Квантовая электроника*, **32**, 1 (2002).
24. Koulikov S.G., Dlott D.D. *J. Photochem. Photobiol. A*, **145**, 183 (2001).
25. Рыкалин Н.Н., Углов А.А., Зуев И.В., Кокора А.Н. *Лазерная и электронно-лучевая обработка материалов* (М.: Машиностроение, 1985).
26. Тимошенко С.П., Гудьер Дж. *Теория упругости* (М.: Наука, 1979).
27. Кикоин И.К. *Таблицы физических величин* (М.: Атомиздат, 1976).