

ПОЛУЧЕНИЕ ТОНКИХ УГЛЕРОДНЫХ ПЛЕНОК ПУТЕМ КОНДЕНСАЦИИ ПАРА, ОБРАЗУЮЩЕГОСЯ ПРИ ЛАЗЕРНОМ ВОЗДЕЙСТВИИ НА МИШЕНЬ

Соломатин К.В. (solomatin@phys.asu.ru), Ярцев В.И. (viyartsev@me.com)
Алтайский государственный университет

Аннотация. Настоящая работа посвящена описанию эксперимента по получению тонких углеродных пленок и его анализу. Представлена структура действующей экспериментальной установки с описанием особенностей ее применения для управляемого формирования тонкопленочных покрытий. Испарение углеродной мишени производится непрерывным лазерным излучением в условиях вакуума. Приведены значения параметров воздействующего лазерного излучения и размеров мишени, необходимых для получения парового облака и эффективного напыления.

Ключевые слова: углеродная пленка, лазер, вакуум.

Задача о взаимодействии лазерного излучения с тугоплавкой поглощающей поверхностью является очень важной как в научном, так и в техническом плане. Большое количество экспериментальных исследований, особенно по воздействию излучения высокой мощности, дало богатый экспериментальный материал, на основе которого получено много практических количественных (или, правильнее сказать, интегральных) соотношений [1]. Теоретические модели также разнообразны [2], однако согласование теории и эксперимента недостаточно. В данной работе рассматривается эксперимент по воздействию мощного непрерывного лазерного излучения на тугоплавкую (углеродную) мишень в условиях вакуума, поставленный авторами.

В ходе проведенных экспериментов нами были отмечены некоторые особенности процесса испарения вещества и его разлета, отличающиеся от полученных ранее [3]. Причина заключается в том, что процесс испарения в настоящей работе является существенно пороговым процессом, тогда как в большинстве других экспериментальных работ плотность мощности воздействующего излучения значительно превышала пороговую плотность мощности необходимую для лазерного разрушения материалов (особенно это касается импульсных режимов взаимодействия [1]).

Экспериментальная установка включает в себя (каждая позиция в перечне сопровождается соответствующей фотографией):

1) вакуумный универсальный пост (ВУП-4) – предназначен для создания разрежения в рабочем объеме с помощью форвакуумного и диффузионного насосов (остаточное давление составляет $5 \cdot 10^{-4}$ мм рт. ст.), которое необходимо для предотвращения окисления (горения) мишени при лазерном воздействии (рис. 1);

2) твердотельный неодимовый лазер на ИАГ (ЛТН-103) – производит лазерное испарение материала мишени (длина волны 1064 нм, рабочая мощность в непрерывном режиме 100 Вт) путем разогрева поверхности при воздействии сфокусированного излучения до температуры свыше 3600 К (рис. 2);

3) механизм позиционирования лазерной мишени – подвижная металлическая конструкция с керамическим зажимом для мишени (использование керамики препятствует рассеиванию энергии мишени путем теплопроводности, что позволяет достичь требуемой температуры поверхности), расположенная внутри рабочего объема, и фокусирующая линза, являющаяся входным окном в рабочую область для излучения лазера (рис. 3);

4) подложки для напыления – стеклянные пластины, склеенные в форме короба; в некоторых из них сделаны отверстия: два – на линии распространения лазерного луча (чтобы исключить поглощение и рассеивание прямого излучения) и одно – для размещения мишени внутри короба на пути луча (рис. 4);

5) миниатюрная углеродная мишень – тонкая пластина в виде «теннисной ракетки» (средняя масса около 5 мг, контролировалась измерением на аналитических весах), выточенная из углеродного стержня (электрода) (рис. 5).

От работы в условиях атмосферы после первых проб пришлось отказаться из-за преобладающего процесса окисления поверхности мишени при воздействии.

Следующие опыты по испарению мишеней в вакууме также были unsuccessfulными, поскольку мишени были «большими» (более 5 мм в диаметре) и «толстыми» (более 2 мм толщиной) и не испарялись под действием излучения по причине больших радиационных потерь. Мишени нагревались до температур активного свечения (более 3000 К), но на этом процесс останавливался и при дальнейшем воздействии состояние мишени (температурное поле в разных ее точках) было стационарным (разумеется, в условиях вакуума). Потери за счет теплопроводности были сведены к минимуму путем специального крепления мишени за «ножку» в керамической трубке.

Произведенная затем миниатюризация мишени позволила получить нагрев до 3600 К в области максимума поглощения (непосредственно в области фокального пятна) и лазерное испарение материала. Характерные размеры таких мишеней показаны на рисунке.

Были выявлены две формы разлета продуктов взаимодействия, которые оказались напрямую связаны с плотностью углеродной мишени. Мишени изготавливались из обработанных заготовок прессованного углерода – углеродных электродов.

В случае малой плотности мишени (около $(0,4-0,5) \text{ г/см}^3$) превалировал процесс фрагментации материала. Это легко объяснить, учитывая пористость или рыхлость структуры, наличие уплотнений и каверн. Поглощаемая энергия ввиду ослабления механизма теплопроводности в окрестности отдельного плотного фрагмента аккумулировалась именно в его пределах, разогревая фрагмент существенно, чем остальной материал, что приводило к его относительному перегреву, откалыванию от основной мишени и вылету из нее. Данный процесс был много раз зафиксирован на видеокамеру, которая регистрировала процесс взаимодействия. Размеры самих фрагментов были невелики и составляли примерно $(10-100) \text{ мкм}$, причем после отрыва от мишени и выхода из области лазерного воздействия они быстро остывали. К сожалению, такие частицы не абсорбировались подложками по ряду причин, поэтому более полное исследование размера и характера вырванных фрагментов получить не удалось.

Плотные мишени (более $0,5 \text{ г/см}^3$) вели себя иначе, и основная доля испаренного вещества разлеталась в форме непрерывного парогазового потока, однородного по своей структуре и светимости. В результате на подложках формировались тонкие, достаточно однородные пленки, которые далее были нами обработаны с помощью атомно-силового микроскопа. Одна из пленок показана на рисунках 6 и 7. Поскольку регулярное испарение и использование потока испаренного вещества для получения тонкопленочных покрытий и было целью данной работы, основное внимание было уделено второму режиму.

Изменение условий взаимодействия, о которых говорилось в начале раздела, привело к тому, что небольшой относительный перегрев передней и задней поверхностей мишени оказался критическим, и, практически, испарение происходило только из области непосредственного поглощения луча в направлении обратном падающему излучению.

Сначала подложки располагались редко на удалении от мишени более 10 см. Однако наиболее полную информацию дала конструкция подложек в форме прямоугольного параллелепипеда, поскольку позволила однозначно восстановить диаграмму направленности вылета испаренного материала. Учитывая форму конструкции, почти весь испаренный материал был осажден на одну из четырех подложек (осаждение на переднюю (пятую) поверхность было незначительным, а на заднюю (шестую) поверхность оно вообще не происходило по причинам обсужденным выше). Это позволило, обработав почернение, получить, что поток по всем направлениям имеет примерно одинаковую интенсивность, т.е. диаграмма направленности представляет собой практически окружность (самой диаграммы построено не было, оценка является приближенной). Следует ожидать, что при более

острой фокусировке или увеличении плотности мощности излучения диаграмма будет вытягиваться вперед.

Полученные пленки содержат много интересной информации, которая не обсуждается в рамках данной статьи, следует заметить только о высоких внутренних напряжениях, возникающих в ней. Это напряжение приводило к отщелкиванию пленки от подложки и ее смятию, что отразилось на рельефе пленки даже на микроскопическом уровне.

На основе данной экспериментальной установки планируется проведение комплексных экспериментов по исследованию вопросов:

- влияние интенсивности воздействующего излучения на диаграмму направленности потока испаренного вещества;
- зависимость скорости испарения материала от соотношения объема и площади поверхности мишени;
- зависимость скорости роста углеродной пленки и характера ее профиля от скорости потока пара и его плотности, а также угла падения частиц на подложку.

Список литературы

1. Действие излучения большой мощности на металлы. / С.И. Анисимов, Я.А. Имас, Г.С. Романов, Ю.В. Ходыко; – М.: Наука, 1970. – 272с.
2. Делоне Н.Б. Взаимодействие лазерного излучения с веществом: Курс лекций. – М.: Наука, 1989. – 280с.
3. Нелинейное взаимодействие лазерного излучения с твердым антропогенным аэрозолем. / В.И. Букатый, И.А. Суторихин, В.Н. Краснопевцев, А.М. Шайдук; – Барнаул: Изд-во Алт. ун-та, 1996. – 198с.



Рис. 1. Рабочая область вакуумного универсального поста (ВУП-4) в ходе процесса



Рис. 2. Неодимовый лазер (слева приборная панель блока управления)



Рис. 3. Механизм позиционирования лазерной мишени

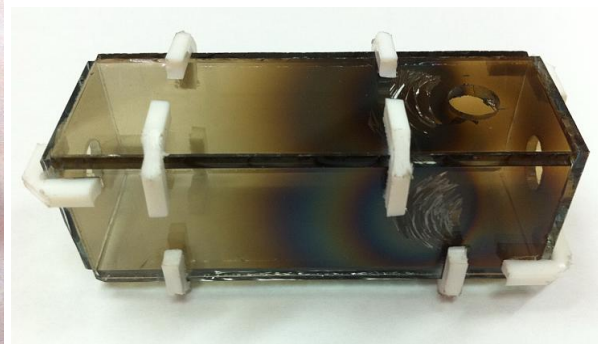


Рис. 4. Подложки для напыления до и после эксперимента

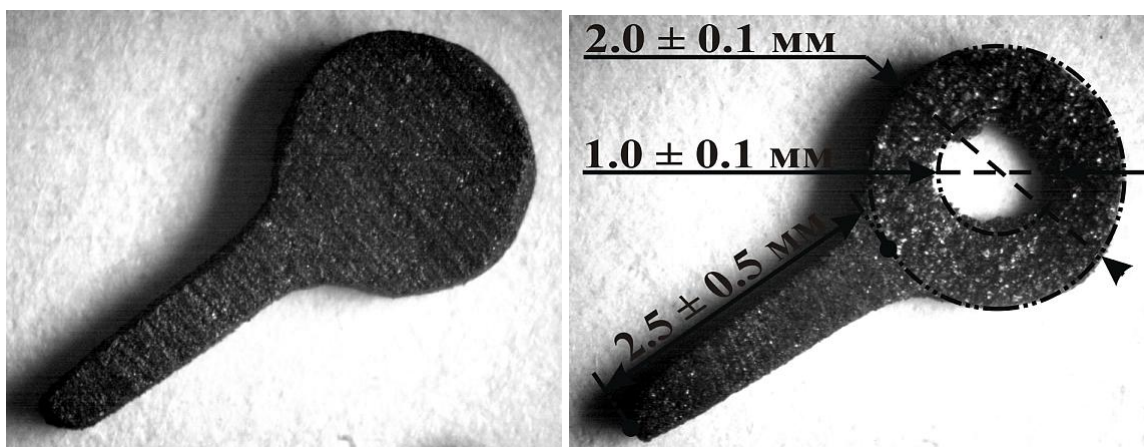


Рис. 5. Миниатюрная углеродная мишень до и после эксперимента

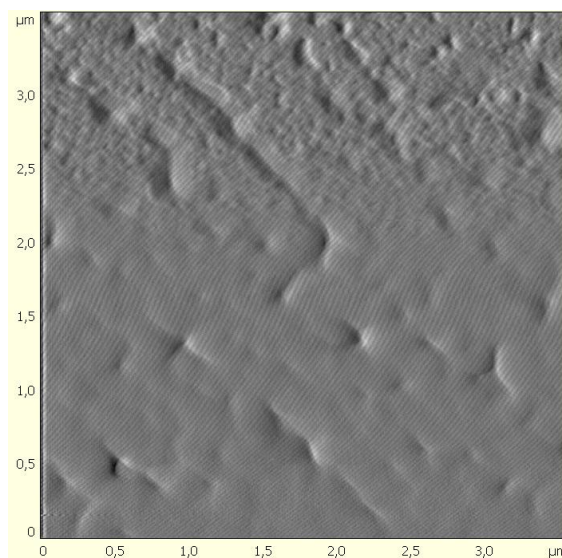


Рис. 6. Снимок полученной в эксперименте пленки на АСМ

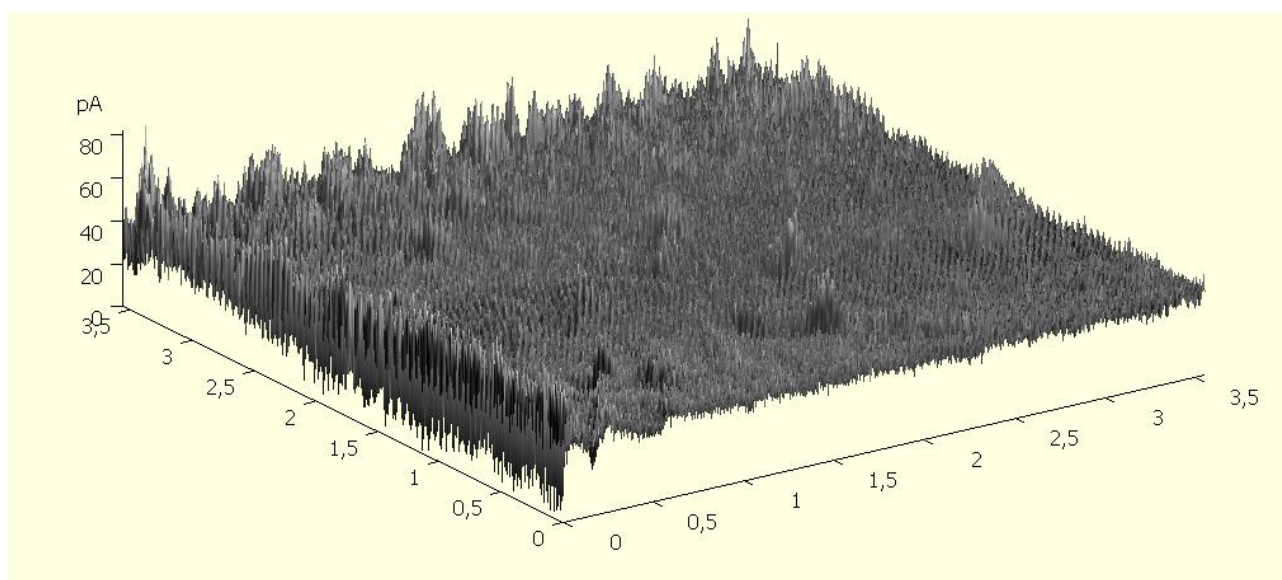


Рис. 7. Трехмерное представление того же фрагмента пленки (в 3D)