

**УПРАВЛЕНИЕ ПОТОКАМИ ЗАРЯЖЕННЫХ ЧАСТИЦ ДЛЯ ПОЛУЧЕНИЯ  
МНОГОСЛОЙНЫХ НАНОСТРУКТУРИРОВАННЫХ ПОКРЫТИЙ ИЗ ЛАЗЕРНОЙ  
ЭРОЗИОННОЙ ПЛАЗМЫ**

**Гончаров В.К., Козлова Е.И., Пузырёв М.В., Ступакевич В.Ю.**

*Научно-исследовательское учреждение "Институт прикладных физических проблем  
им.А.Н.Севченко" Белорусского государственного университета  
Минск, Беларусь, puzyrev@bsu.by*

Одним из способов осаждения наноплёнок на различные материалы (подложки) является лазерно-плазменный метод. Он имеет несколько преимуществ перед другими методами. Во-первых, это возможность получить плазму практически из любого вещества, во-вторых стерильность, то есть при нанесении плёнок в вакууме лазерное излучение не вносит дополнительных примесей в осаждаемое покрытие. Кроме того, лазерно-плазменный метод позволяет легко автоматизировать процесс нанесения плёнок.

Однако в настоящее время процесс контроля режимов нанесения покрытий лазерно-плазменным методом определяется в основном изменением плотности мощности взаимодействующего лазерного излучения и расстояния от подложки до лазерной мишени. При этом следует учесть, что эрозионный лазерный факел в вакууме имеет достаточно сложную пространственную структуру: формирование двойного электрического слоя, достаточно сложного взаимодействия электронных и ионных потоков на фоне плазодинамических процессов. Настоящая работа посвящена получению из лазерной плазмы потока ионов, энергию которых легко регулировать, изменяя скорость ионов с помощью электрического поля и осаждению металл-углеродных покрытий.

Для воздействия на мишень был использован импульсный YAG:Nd<sup>3+</sup> – лазер LS-2137 фирмы Лотис-ТИИ с длиной волны  $\lambda = 1064$  нм и длительностью импульса на полувывоте  $\tau = 20$  нс. Мишени, изготовленные из высокотемпературного пиролитического графита марки УПВ-1 и алюминия марки А7, устанавливались под углом 45° к оси лазерного луча. Эксперименты проводились в вакууме при давлении остаточных газов  $\sim 10^{-3}$  Па. Мишень вращалась со скоростью 2 об/мин, чтобы предотвратить образование глубокого кратера на её поверхности, что может сказаться на пространственной форме эрозионного факела.

Измерения токовых характеристик эрозионной плазмы материала мишени проводились с помощью осциллографа Tektronix TDS2022.

Как показали эксперименты, эрозионный лазерный факел в вакууме имеет сложную структуру. На некотором расстоянии от мишени формируется двойной электрический слой. На переднем фронте находится слой более легких электронов, а после них летит слой более тяжелых ионов. При достижении подложки эти слои взаимодействуют друг с другом, формируя сложную электродинамическую картину. Управление процессом нанесения нанопокровов в этом случае сильно усложняется. В настоящей работе предложено поместить между мишенью и подложкой сетку. При подаче на сетку по отношению к мишени некоторого отрицательного потенциала (см.рис.1) удается получить поток заряженных частиц после сетки, состоящих преимущественно из ионов. Это происходит за счет того, что электроны отражаются от сетки и попадают на мишень. Ионы при этом притягиваются сеткой и, пройдя сквозь нее, движутся к подложке. Как видно из рисунка 1 при подаче небольшого отрицательного потенциала на сетку по отношению к мишени достаточно заметно увеличивает скорость ионов. При дополнительной подаче на сетку по отношению к подложке положительного потенциала происходит управление ионным потоком (см.рис.2) Из рисунка 2 видно, что при увеличении потенциала между сеткой и подложкой происходит не только увеличение скорости всего ионного потока, но и рост величины потока за счет фокусировки.

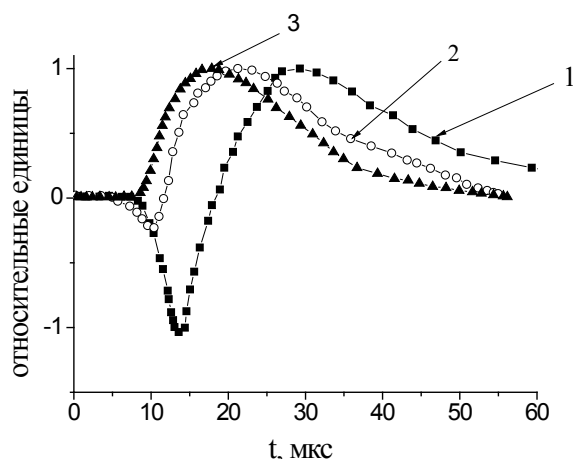


Рисунок 1 - Зависимость интенсивности ионной компоненты эрозионного лазерного факела графитовой мишени на подложке для различных отрицательных потенциалов сетки по отношению к мишени: 1 – 0 В; 2 – 0,5 В; 3 – 2 В.

качественная картина получается и для алюминиевой мишени с разницей в конкретных значениях потенциалов.

На предыдущих этапах исследования с помощью технологии лазерно-плазменного осаждения нами были получены экспериментальные образцы алмазоподобных углеродных пленок с высоким содержанием  $sp^3$  – связанного углерода (до 50%).

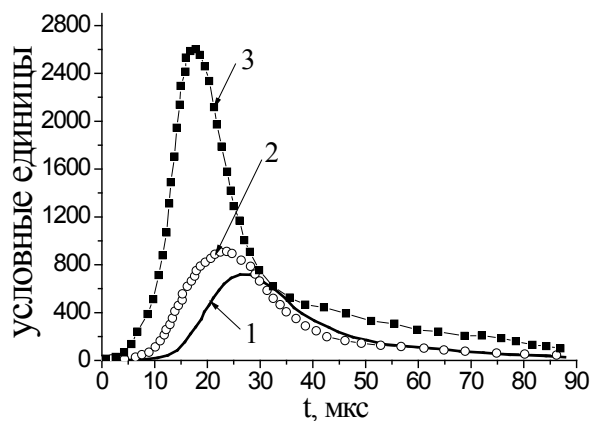


Рисунок 2- Зависимость во времени тока ионной компоненты углеродной лазерной плазмы на подложке при различных положительных потенциалах сетки по отношению к подложке: 1 – 30 В; 2 – 50 В; 3 – 400 В. На управляющей сетке отрицательный потенциал по отношению к мишени 2,0 В.

слоев.

В данной работе ставилась цель оптимизации состава, структуры и технологии осаждения адгезионных и промежуточных слоев с целью получения сверхтвердых композиционных защитных покрытий на основе алмазоподобного углерода.

Как правило, для улучшения адгезии алмазоподобной углеродной пленки к подложке осаждают промежуточные слои из металла, выбранного из группы, включающей алюминий, хром, цирконий, титан, германий, или из кремния. В наших экспериментах для создания адгезионного слоя был выбран алюминий. Было

Это позволяет при больших скоростях ионов предварительно травить в вакууме поверхность подложки. При снижении скорости ионов можно создать псевдодиффузные слои для повышения адгезии. При малых скоростях ионов происходит осаждение основного слоя. При этом режимы обработки поверхности подложек легко автоматизировать, управляя потенциалами на сетке по отношению к мишени и подложке двумя независимыми источниками.

На рисунке 1 и 2 представлены результаты экспериментов при воздействии лазерного излучения на графитовую мишень. Аналогично

Пленки  $ta-C$  характеризуются высоким уровнем внутренних напряжений (до 10÷12 ГПа). Внутренние напряжения в алмазоподобных углеродных пленках в ряде случаев при определенной толщине покрытия приводят к его самопроизвольному отслоению от подложки. Проведенные нами предварительные эксперименты показали, что проблема отслоения углеродной пленки от подложки за счет внутренних напряжений характерна и для покрытий, получаемых лазерно-плазменным методом.

Одним из перспективных методов уменьшения внутренних напряжений в пленке является осаждение промежуточных

предложено производить осаждение алюминия с использованием того лазерно-плазменного метода, что и для осаждения алмазоподобных углеродных пленок.

Были получены экспериментальные образцы двухслойных композиционных покрытий, состоящих из адгезионного алюминиевого слоя толщиной 50-70 нм и алмазоподобной углеродной пленки толщиной 200-250 нм.

Однако эксперименты показали, что даже при наличии дополнительного адгезионного слоя, отслоение алмазоподобной пленки все равно происходит при толщинах более 300 нм.

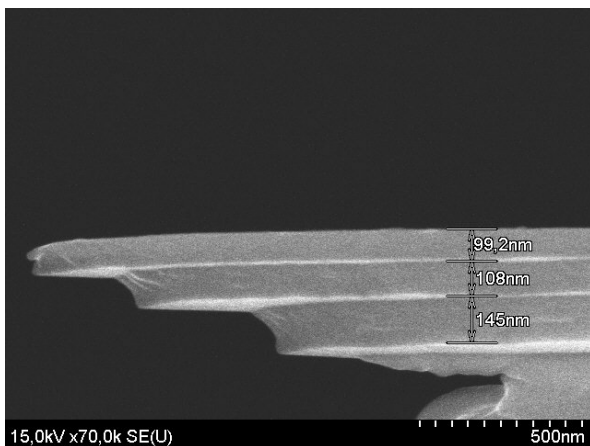


Рисунок 3 - Многослойное углерод-алюминиевое покрытие, осажденное на кремниевую подложку (светлые полосы - алюминий)

На основании полученных результатов был предложен вариант многослойного покрытия, состоящего из нескольких чередующихся углеродных и алюминиевых слоев. Причем толщина слоев алмазоподобного углерода не должна превышать 200 нм. Пример такого покрытия приведен на рисунке 3. Стрелками указаны углеродные слои. Плотность мощности воздействующего лазерного излучения на графитовую мишень составляла  $1,07 \cdot 10^9$  Вт/см<sup>2</sup>, при воздействии на алюминиевую мишень  $5,66 \cdot 10^8$  Вт/см<sup>2</sup>.

По подобной технологии были получены экспериментальные образцы покрытий толщиной до 0,7 мкм. Показано, что многослойное покрытие обладает лучшей адгезией к материалу подложки по сравнению с двухслойным при сохранении механических характеристик алмазоподобного углерода.

Таким образом, при размещении между лазерной мишенью и подложкой сетки, на которую по отношению к лазерной мишени подается отрицательный потенциал, с помощью величины потенциала можно регулировать соотношение электронов и ионов, попадающих на подложку.

Для конкретного эксперимента найден отрицательный потенциал сетки по отношению к мишени (- 2В), при котором на подложку поступают только ионы.

Подавая на сетку положительный потенциал по отношению к подложке можно управлять энергией ионов. При этом происходит не только увеличение энергии ионов, но и с увеличением положительного потенциала на сетке по отношению к подложке происходит увеличение плотности ионного потока (фокусировка).

Источник ионов из лазерной плазмы с регулируемой энергией ионов перспективно использовать для нанесения высокоадгезионных нанопленок различных материалов на подложки из различных материалов с достаточно простой автоматизацией процесса нанесения.