

РЕЖИМЫ НАНЕСЕНИЯ АЛЮМИНИЕВЫХ НАНОСТРУКТУР С ПОМОЩЬЮ ЛАЗЕРНО-ПЛАЗМЕННГО ИСТОЧНИКА

Научно-исследовательское учреждение "Институт прикладных физических проблем им. А. Н. Севченко" Белорусского государственного университета, Минск, Республика Беларусь

Для плавной регулировки энергии наносимых на подложку ионов между лазерной мишенью и подложкой располагается сетка, на которую по отношению к лазерной мишени подается отрицательный потенциал. В результате после сетки формируется поток частиц, состоящий преимущественно из ионов энергией которых можно надежно и плавно управлять в большом динамическом диапазоне, подавая на сетку по отношению к подложке положительный потенциал. Показано, что физические процессы, происходящие в промежутке сетка-подложка при заземленной сетке не влияют на физические процессы в промежутке мишень-сетка. Найдены условия, когда лазерно-плазменный источник для нанесения нанопокрывтий с использованием ионных потоков позволяет производить травление поверхности подложки за счет вторичной эмиссии, создавать за счет имплантации псевдодиффузный слой материала лазерной мишени в приповерхностном слое материала подложки и наносить материал лазерной мишени на поверхность подложки. Все это можно производить не разгерметизируя вакуумную камеру, что позволит получать высокоадгезионные нанопокрывтия в стерильных условиях.

Основным преимуществом лазерно-плазменного метода нанесения нанопокрывтий является: стерильность, возможность получить плазму из любого вещества. Кроме того, лазерно-плазменный метод обладает воспроизводимостью при осаждении нанопокрывтий и позволяет контролировать их состав. Нанесение нанопокрывтий с помощью лазерно-плазменного метода достаточно просто. При воздействии лазерного излучения на мишень формируется эрозионный плазменный факел. Если на некотором расстоянии от мишени поместить подложку, то на ней осаждается пленка. К сожалению, в этом случае затруднена плавная регулировка параметров плазмы эрозионного факела. Регулировать параметры эрозионного факела можно, изменяя плотность мощность лазерного излучения, которая в свою очередь регулируется изменением энергии в лазерном импульсе и изменением фокусировки. Динамический диапазон современных технологических лазеров не велик, а динамические устройства плавной регулировки фокусного расстояния сложны, дороги и ненадежны.

Для устранения этого недостатка в [1] было предложено разместить между мишенью и подложкой сетку. Подавая на сетку отрицательный потенциал по отношению к мишени можно после сетки получить поток заряженных, частиц состоящий преимущественно из ионов, а подавая на сетку плавно изменяющийся положительный потенциал по отношению к подложке, можно в большом динамическом диапазоне плавно изменять энергию ионов, падающих на подложку. Для того чтобы источники питания в цепи мишень-сетка и сетка-подложка были независимыми сетку необходимо заземлить.

Для воздействия на мишень использовался импульсный YAG: Nd³⁺ лазер LS-2137 фирмы Lotis – ТП (Беларусь-Япония) с длиной волны $\lambda = 1064$ нм и длительностью импульса по полувывсоте $\tau \sim 20$ нс. Частота следования лазерных импульсов $1 \div 10$ Гц, энергия в отдельном импульсе $0,1 \div 0,5$ Дж.

Электрическая схема эксперимента изображена на рисунке 1. Расстояние мишень-подложка составляло 12 см, сетка располагалась на середине этого промежутке. В качестве мишеней использовался технически чистый алюминий А7. Подложки изготовлены из кремния КДБ-03 размером 12,5x35 мм. $R_{н1} = R_{н2} = 390$ Ом.

Рассмотрим процессы, происходящие в промежутке мишень-сетка при различных потенциалах и плотностях мощности воздействующего лазерного излучения. Как было показано в [2] при воздействии лазерного импульса с плотностью мощности $5,6 \cdot 10^8$ Вт/см² на графитовую мишень достаточно подать отрицательный потенциал на сетку по отношению к

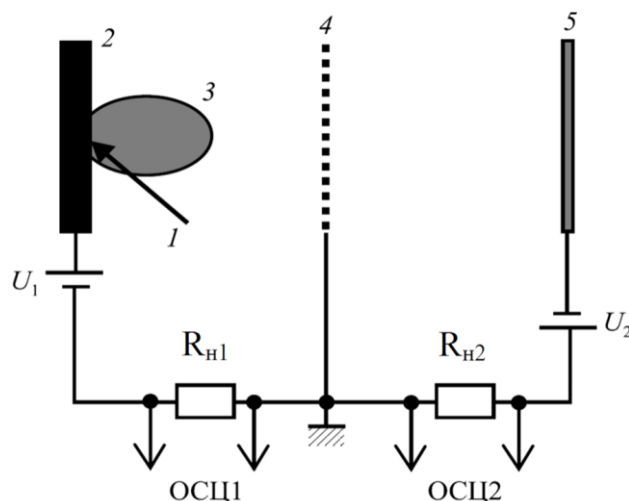


Рисунок 1 – Схема управления электронными и ионными составляющими эрозионной лазерной плазмы
 1 – лазерное излучение; 2 – мишень; 3 – эрозионный плазменный факел; 4 – сетка;
 5 – подложка, ОСЦ1 и ОСЦ2 – сигналы, снимаемые осциллографом с нагрузок $R_{н1}$ и $R_{н2}$
 U_1 – потенциал между сеткой и мишенью, U_2 – потенциал между сеткой и подложкой

подложке 2,5 В, чтобы после сетки сформировался поток заряженных частиц, состоящий преимущественно из ионов. Однако, учитывая, что в экспериментах при различных плотностях мощности лазерного излучения формируется эрозионный лазерный факел с различным плазодинамическим давлением, температурой и ионизацией, необходимо увеличить этот потенциал до 10÷30 В.

На рисунке 2 представлены кривые тока в промежутке мишень-сетка (1) и тока в промежутке сетка-подложка (2) при потенциале в промежутке мишень-сетка 30В, а к промежутку сетка-подложка потенциал не приложен. Эти результаты получены при воздействии относительно малой плотности мощности лазерного излучения $2,9 \cdot 10^8$ Вт/см² на алюминиевую мишень. Как видно из рисунка кривая тока в промежутке мишень-сетка "двугорбая", первый "горб" формируется за счет обратного тока электронов, как наиболее легких частиц, на мишень за счет потенциала электрического поля в промежутке мишень-сетка. Второй "горб" формируется за счет ионов, движущихся к сетке. После сетки формируется поток заряженных частиц, состоящий из ионов. Поэтому кривая тока (2) "одногогорбая".

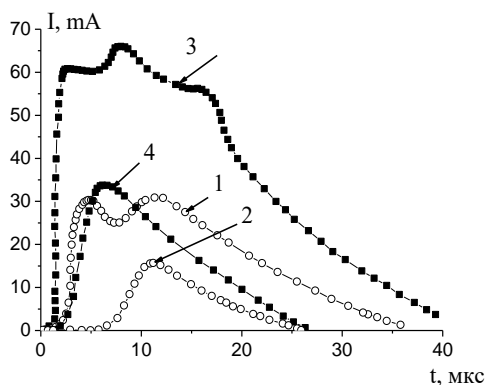


Рисунок 2 – Зависимость тока от времени для различных плотностей мощности q воздействующего лазерного излучения на алюминиевую мишень. $q=2,9 \cdot 10^8$ Вт/см²: 1 – ток в промежутке мишень-сетка, 2 – ток в промежутке сетка-подложка. $q=5 \cdot 10^8$ Вт/см²: 3 – ток в промежутке мишень-сетка, 4 – ток в промежутке сетка-подложка

При увеличении плотности мощности воздействующего лазерного излучения плазменный факел формируется с большим плазодинамическим давлением, большей температурой, многократной ионизацией и большего заряда в двойном электрическом слое. За счет этого формирование потоков заряженных частиц в промежутке мишень-сетка усложняется. На рисунке 2 представлены кривые потоков заряженных частиц в промежутке мишень-сетка при

Секция 3. Прикладные проблемы радиофизики

воздействии лазерного излучения плотностью мощности $5 \cdot 10^8$ Вт/см² на мишень из алюминия. Как видно из рисунка 2 кривая 3 имеет несколько "горбов".

При увеличении плотности мощности лазерного излучения концентрация ионов увеличивается, в том числе и за счет многократной ионизации. Таким образом, форму кривой 3 рисунка 2 можно объяснить следующим образом. При появлении плазмы в промежутке мишень-сетка электрическое поле заставляет ионы двигаться к отрицательному потенциалу сетки, а электроны к мишени. Однако, из-за экранирующего действия потенциала сетки ионами, электроны двигаются с небольшой скоростью к сетке за счет динамики продуктов разрушения или совсем с небольшой скоростью к поверхности мишени. В это время ток в цепи мишень-сетка определяется в основном током ионов (первый "горб" рисунок 2, кривая 3). Как только основной ток ионов долетел до сетки (~ 4 мкс после начала воздействия лазерного излучения) потенциал, поданный на нее с источника U_1 уже не заэкранирован ионами и электроны начинают двигаться в сторону мишени, резко увеличивая обратный ток электронов (второй "горб"). Третий "горб" на кривой 3 определяется прямым ионным потоком и обратным потоком электронов в конце распадающегося плазменного факела с уменьшающимися параметрами. При этом форма кривой ионного тока в промежутке сетка-подложка представляет собой ассиметричный колокол (см. рисунок 2, кривая 4).

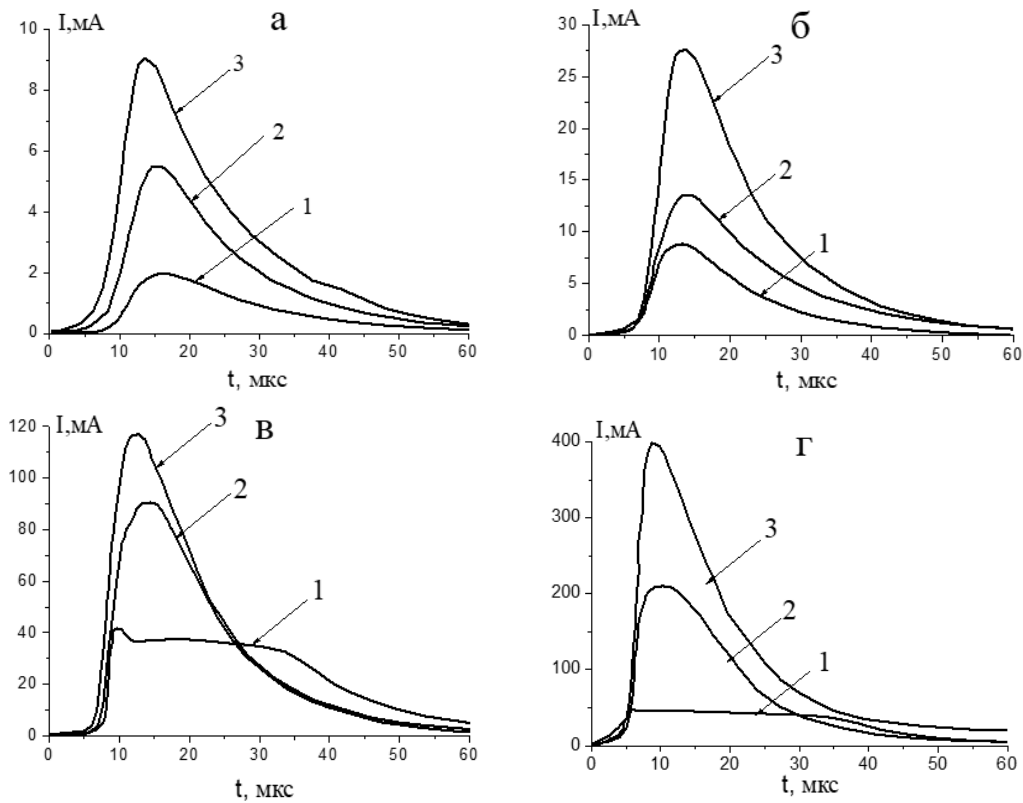


Рисунок 3 – Зависимость тока на подложке от времени при различных плотностях мощности лазерного излучения и различных ускоряющих потенциалах между сеткой и подложкой: а – $2,5 \cdot 10^8$ Вт/см²; б - $2,9 \cdot 10^8$ Вт/см²; в - $3,4 \cdot 10^8$ Вт/см²; г - $3,7 \cdot 10^8$ Вт/см²; 1- 50 В, 2 – 200 В, 3 – 400 В.

Рассмотрим теперь процессы в промежутке сетка-подложка. Результаты таких экспериментов представлены на рисунке 3. При относительно малых плотностях мощности лазерного излучения ($2,5 \cdot 10^8$ Вт/см²) ионные потоки, падающие на подложку, зависят от приложенного потенциала к промежутку сетка-подложка (см. рисунок 3А). При этом временная форма импульсов представляет ассиметричный колокол. При увеличении плотности мощности лазерного излучения до $2,9 \cdot 10^8$ Вт/см² качественные результаты аналогичны предыдущему случаю, однако заметно значительное увеличение ионного потока на подложку (см. рисунок 3Б). Увеличение потенциала в промежутке сетка-подложка приводит к увеличению тока ионов на подложку. Рассмотрим подробно рисунок 3В. При плотности мощности лазер-

ного излучения $3,4 \cdot 10^8$ Вт/см² и потенциале в промежутке сетка-подложка 50 В наблюдается резкое ограничение ионного тока. Как было показано в [3] такое ограничение обусловлено вторичной эмиссией ионов с поверхности подложки. При увеличении потенциала в промежутке сетка-подложка кинетическая энергия первичных ионов у поверхности мишени достигает такой величины, что из-за уменьшения сечения столкновения в этом случае наблюдается имплантация материала мишени в приповерхностную область материала подложки. При этом кривая токов на подложку опять ассиметричный колокол. Ионный поток в этом случае значительно возрастает. При увеличении плотности мощности воздействующего лазерного излучения величина токов существенно увеличивается (рисунок 3Г).

Однако несмотря на такие сложные изменения ионных токов в промежутке сетка-подложка, в промежутке мишень-сетка общая кривая тока при используемых плотностях мощности представляет собой двугорбую кривую (см. рисунок 2, кривая 1) и таким образом процессы в промежутке сетка-подложка не влияют на процессы в промежутке мишень-сетка. Это происходит из-за того, что в используемой электрической схеме (см. рисунок 1) заземлена сетка. При большей плотности мощности лазерного излучения кривая общего тока в промежутке мишень-сетка будет "трехгорбой", но и в этом случае физические процессы в промежутке сетка-подложка не влияют на процессы в промежутке мишень-сетка.

Таким образом, эксперименты показали, что в лазерно-плазменном источнике для нанесения нанопокровов физические процессы, происходящие в промежутке, сетка-подложка, не влияют на физические процессы в промежутке мишень-сетка. Это обусловлено тем, что в электрической схеме источника заземлена сетка. Показано, что лазерно-плазменный источник для нанесения нанопокровов с использованием ионных потоков позволяет при определенных условиях производить травление поверхности подложки за счет вторичной эмиссии, создавать за счет имплантации псевдодиффузный слой материала лазерной мишени в приповерхностном слое материала подложки и наносить материал лазерной мишени на поверхность подложки. Все это можно производить не разгерметизируя вакуумную камеру, что позволит получать высокоадгезионные нанопокровы в стерильных условиях.

Список литературы

1. Устройство управления параметрами эрозионного лазерного факела в вакууме для осаждения наноструктурированных покрытий на различные материалы пат. 12575 Респ. Беларусь МПК С 23С 14/00 (2006.01), С 23С 28/00 (2006.01) /Гончаров В.К., Пузырев М.В. Ступакевич В.Ю., заявитель Научно-исследовательское учреждение "Институт прикладных физических проблем им. А.Н.Севченко" Белорусского государственного университета заявл. 16.01.2020; опубл. 30.04.2021 // Афіцыйны бюл. Нац. цэнтр інтэлектуал. уласнасці. – 2021. – № 2. – С. 72.

2. Гончаров В.К., Василевич А.Е., Пузырев М.В., Ступакевич В.Ю. Лазерно-плазменный источник ионов с регулируемой энергией для нанесения наноплёнок // Электроника инфо. – 2016. - №11. - С 54-57

3. Гончаров, В.К., Пузырев М.В., Ступакевич В.Ю. Физические процессы в лазерном источнике ионов алюминия с управляемой энергией для нанесения нанопенок // Журнал Белорусского государственного университета. Физика. - 2017. - № 3 – С.79-87.