

ПАРАМЕТРЫ НАНОРАЗМЕРНЫХ ЦИНКОВЫХ ПЛЕНОК, ОСАЖДЕННЫХ В ВАКУУМЕ ЛАЗЕРНЫМ СПОСОБОМ

В.К. Гончаров, Г.А. Гусаков, М.В. Пузырев
НИИ ПФП им. А.Н.Севченко БГУ, лаборатория лазерной плазмодинамики
220045, Беларусь, Минск, ул. Курчатова, 7, e-mail: puzyrev.bsu.by

Проведены исследования тонких цинковых пленок, осаждаемых лазерно-плазменным методом. Установлена зависимость толщины и структуры поверхности пленок от плотности мощности лазерного излучения. Определена пороговая плотность мощности, при которой начинается испарение материала мишени.

Введение

Задача получения покрытий с высокой проводимостью при низких температурах подложки (ниже 300 °С) и без последующей операции отжига является актуальной, например, при изготовлении многослойных покрытий солнечных батарей (так как при низкой температуре замедляются процессы взаимной диффузии слоев), или при напылении проводящих покрытий на полимерные подложки при температурах, не превышающих температуру размягчения материала. Прозрачные гибкие проводники являются важными компонентами электронных и оптоэлектронных устройств, например, интерактивной электроники, вживляемых медицинских приборов и роботизированных систем с человекообразными способностями к восприятию. Данные компоненты облегчают взаимодействие человека с устройством и улучшают биологическую обратную связь.

Одним из наиболее перспективных методов получения наноструктурированных металлических пленок является метод импульсного лазерного осаждения (ИЛО) [1]. В ходе ИЛО происходит распыление мишени в вакууме импульсами лазера и осаждение материала мишени на подложку. Достоинствами этого метода является простота реализации, высокая скорость напыления, одинаково хорошее испарение всех химических элементов, содержащихся в мишени [2]. При испарении мишеней при определенных условиях можно получить пленку необходимого стехиометрического состава.

Вместе с тем, известно, что при воздействии на металлические мишени лазерными импульсами в частотном режиме на поверхности подложки могут осаждаться частицы конденсированной фазы материала мишени. Механизмы формирования и размеры частиц жидкокапельной фазы в лазерных эрозионных факелах могут различаться. При этом преобладание того или другого механизма зависит от условий воздействия (энергии в отдельном лазерном импульсе, фокусировки, частоты лазерных импульсов, скорости перемещения лазерного луча по поверхности мишени и др.) [3 – 6].

В данной работе ставилась задача методом ИЛО получить тонкие прозрачные однородные металлические покрытия на основе цинка с минимальным содержанием жидкокапельных частиц. Выбор объекта обусловлен тем, тонкие пленки на основе Zn и ZnO в последнее время рассматриваются в качестве одного из наиболее перспективных материалов "прозрачной" электроники [7].

Методика эксперимента

Для осаждения пленок применялся импульсный YAG:Nd³⁺ лазер (1,06 мкм) LS-2137 фирмы

Lotis-TII с длиной волны $\lambda = 1064$ нм и длительностью импульса по полуширине $\tau = 20$ нс. Частота следования лазерных импульсов 10 Гц. Длительность осаждения составляла 1 час. Мишени устанавливались под углом 45° к оси лазерного пучка. В качестве подложек использовался кремний и кварцевое стекло. Осаждение проводилось в вакууме при давлении остаточных газов $\sim 10^{-3}$ Па. Подложки располагались параллельно поверхности мишени. Расстояние между подложкой и мишенью составляло ~ 10 см. Мишени были изготовлены из технически чистого цинка. Энергия импульса лазерного излучения (ЛИ) изменялась в диапазоне 140...170 мДж. Плотность мощности ЛИ изменялась за счет изменения фокусировки лазерного пучка. Диаметр лазерного пятна на поверхности мишени изменялся в диапазоне 1÷3 мм. Средняя плотность мощности ЛИ, определяемая как отношение мощности импульса к площади лазерного пятна, изменялась в диапазоне $9,9 \cdot 10^7$ Вт/см² ÷ $8,9 \cdot 10^8$ Вт/см². При этом с учетом Гауссова распределения энергии в лазерном пятне максимальная плотность мощности изменялась в пределах $3 \cdot 10^8$ Вт/см² ÷ $2,7 \cdot 10^9$ Вт/см².

Структура поверхности пленок изучалась на растровых электронных микроскопах LEО 1455 VP фирмы Carl Zeiss Германия, 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). Параметры эрозионного кратера на поверхности мишени регистрировались с помощью оптического микроскопа МКТФ-1.

Результаты и обсуждение

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 нами были проведены измерения линейных размеров эрозионных кратеров, образующихся на поверхности мишени в результате воздействия ЛИ с различной плотностью мощности.

Эксперименты показали, что при одной и той же энергии лазерного импульса, равной 140 мДж, при пятне облучения 1 мм кратер имел диаметр 1,25 мм, при пятне облучения 2 мм - диаметр 1,4 мм, а при пятне облучения 3 мм - диаметр 0,4 мм. Наблюдаемая картина связана с уменьшением плотности мощности излучения с ростом диаметра лазерного пятна. При диаметре лазерного пучка 3 мм на краях пятна плотность мощно-

сти оказывается недостаточной для начала эффективного испарения материала мишени. При уменьшении диаметра лазерного пучка до 1 мм локальная плотность мощности лазерного излучения возрастает приблизительно в 10 раз, и ее уже хватает для начала испарения материала мишени даже в периферийной части лазерного пятна. Кроме того, при большей плотности мощности за время действия лазерного импульса за счет теплопроводности и значительного градиента температур прогревается область на значительном расстоянии от зоны облучения. В результате, диаметр эрозионного кратера превышает диаметр лазерного пятна. На основании описанных выше результатов с учетом гауссова распределения энергии в пятне можно сделать вывод, что для цинка пороговая плотность мощности ЛИ составляет $2,6 \cdot 10^8$ Вт/см².

На рисунке 1 приведена зависимость толщины цинковых пленок от средней плотности мощности ЛИ. Хорошо видно, что скорость осаждения покрытий практически линейно увеличивается с ростом плотности мощности.

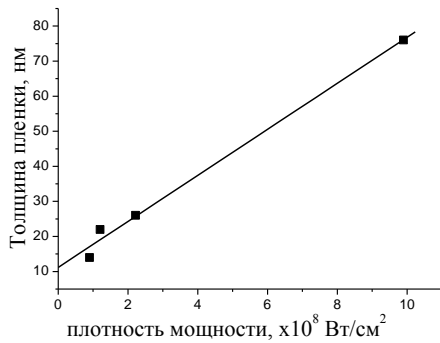


Рис. 1. Зависимость толщины осаждаемых пленок от плотности мощности воздействующего лазерного излучения для цинковой мишени

На рисунках 2-4 приведены результаты электронно-микроскопических исследований поверхности пленок, осаждаемых при различных значениях плотности мощности ЛИ. Хорошо видно (рисунок 2), что при средней плотности мощности лазерного излучения $0,99 \cdot 10^8$ Вт/см² для цинковой мишени удается получить практически бескапельные пленки. На рисунке 3 представлены распределения частиц по размерам при различных условиях экспериментов. Основная масса наблюдаемых частиц имеют линейные размеры в диапазоне 0,1 – 5 мкм. Частицы с размерами более 5 мкм встречаются достаточно редко. Частицы с размером меньше 0,1 мкм практически отсутствуют. Полученные результаты говорят о том, что в случае испарения цинка лазерными импульсами в исследованном диапазоне плотностей мощности ЛИ формирование жидкокапельной фазы происходит преимущественно за счет гидродинамического механизма [3,4]. Механизмы объемного парообразования [5] и конденсации продуктов разрушения [6] играют второстепенную роль. С другой стороны, можно предположить, что наночастицы жидкокапельной фазы материала мишени, формирующиеся в эрозионном факеле за счет данных механизмов, при попадании на поверхность подложки формируют нанопленку. В

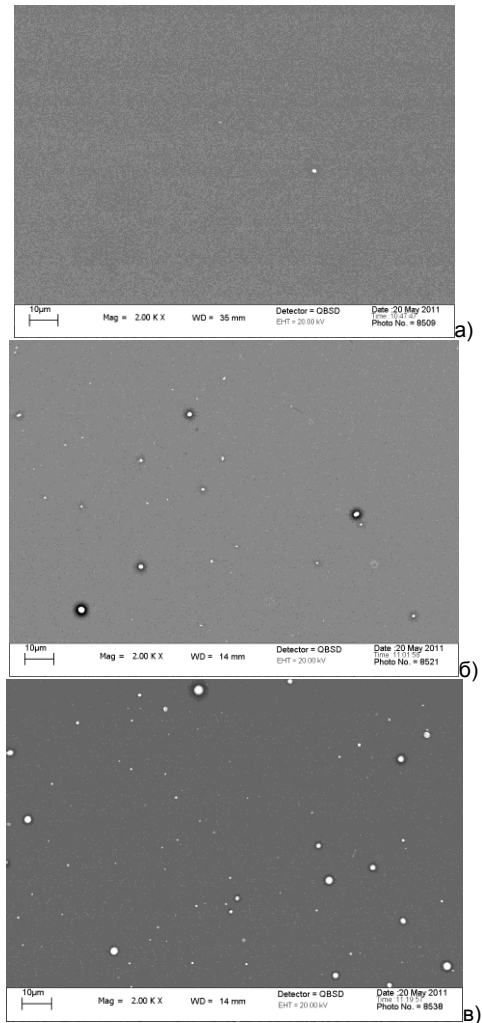


Рис. 2. Микрофотографии поверхности цинковой пленки для различных плотностей мощности воздействующего лазерного излучения:

а) $0,99 \cdot 10^8$ Вт/см², б) $2,2 \cdot 10^8$ Вт/см², в) $8,9 \cdot 10^8$ Вт/см²

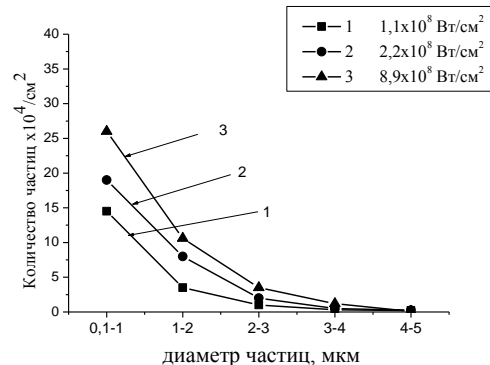


Рис. 3. Распределение частиц по размерам при различных средних плотностях мощности воздействующего лазерного излучения на цинковую мишень

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, попадая на поверхность подложки, вызывают существенные нарушения однородности осаждаемого

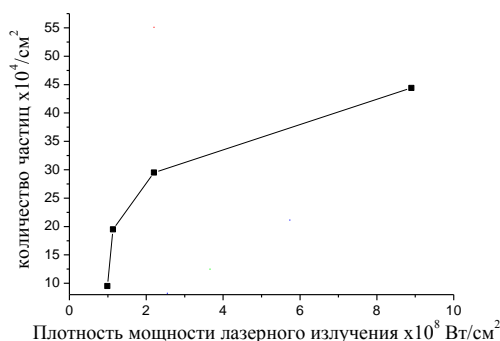


Рис. 4. Зависимость количества частиц на квадратный сантиметр от плотности мощности воздействующего лазерного излучения: расстояние между подложкой и мишенью 10 см

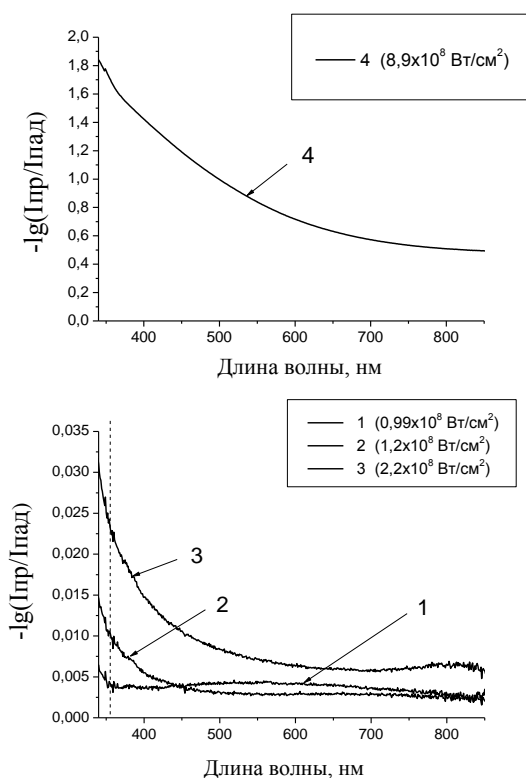


Рис. 5. Спектральные характеристики цинковых пленок для различных плотностей мощности воздействующего лазерного излучения

покрытия. На рисунке 4 приведена зависимость количества частиц на поверхности осаждаемых пленок от плотности мощности ЛИ. При уменьшении плотности мощности количество частиц на поверхности пленки уменьшается, что хорошо согласуется с существующими представлениями о процессах образования капельной фазы при согласуется с существующими представлениями

о процессах образования капельной фазы при воздействии на металлические мишени мощных лазерных импульсов [3-6]. На рисунке 5 представлены спектральные характеристики коэффициента потерь (экстинкции) при различных условиях осаждения. Видно, что пленки осаждаемые при плотностях мощности $P \leq 2 \cdot 10^8$ Вт/см² характеризуются высокой прозрачностью в видимом диапазоне спектра. С ростом плотности мощности ЛИ начинает проявляться поглощение в синеволетовой области спектра, которое, по видимому, связано с образованием соединения типа ZnO_x, где $x < 1$. В результате, пленки, осаждаемые при повышенных плотностях мощности, приобретают коричневый оттенок.

Выводы

В результате проведенных экспериментов показана принципиальная возможность получения методом ИЛО тонких прозрачных цинковых пленок с высокой степенью однородности поверхности. Определена пороговая плотность мощности лазерного излучения, при которой начинается интенсивное испарение цинка. По нашим данным она составляет величину $2,6 \cdot 10^8$ Вт/см². Показано, что толщина осаждаемых пленок имеет линейную зависимость от покрытий от плотности мощности воздействующего лазерного излучения.

В дальнейшем планируется провести исследования электрофизических характеристик осаждаемых покрытий, а также изучить возможность лазерного осаждения тонких пленок оксида цинка.

Список литературы

1. Коноплев Б.Г., Агеев О.А. // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2008. – № 12 (89). – С. 165.
2. Caricato A.P., Creti A., Luchesa A., Lomascolo M., Martino M., Rella R., Valerini D. // Laser Physics. – 2011. – Т 21. – №3. – Р. 588.
3. Уляков П.И. Некоторые закономерности разрушения твердых сред излучением ОКГ // ЖЭТФ. - 1967. - Т.52, Вып. 3. - С. 820 - 831.
4. Путренко О.И., Янковский А.А. Исследование световой эрозии металлов в течение импульса генерации ОКГ // ЖПС. - 1971. - Т. 15, №4. - С. 596 - 604.
5. Анисимов С.И., Имас Я.А., Романов Г.С., Ходыко Ю.В. Действие лазерного излучения большой мощности на металлы. - М.: Наука, 1970.
6. Гончаров В.К. Воздействие на металлы высокоэнергетических импульсов излучения неодимового лазера различной пространственно-временной формы // ИФЖ. - 2001. - Т.74, №5. - С.87-97.
7. Гончаров В.К., Козадаев К.В. Формирование конденсированной фазы металлов при воздействии на них субмикросекундных лазерных импульсов // ИФЖ. - 2010. - Т.83, № 1. - С.1 – 5.

PARAMETERS NANODIMENSIONAL ZINC FILMS DEPOSITED BY THE LASER METHOD IN VACUUM

V.K.Goncharov, G.A.Gusakov, D.R.Imailov, M.V.Puzryev
Research Institute of Applied Physical Problems of Belarussian State University

The investigation of the thickness and structure of a zinc films surface produced by the laser-plasma deposition has been carried out. The dependence of a film thickness and surface structure from laser radiation intensity has been determined. Threshold intensity has been determined when an evaporation of a target material begins.