

ния можно сделать вывод, что через ~20-60 нс (в зависимости от металла) после начала лазерного воздействия в приповерхностной области мишени формируется интенсивно светящееся плазменное образование. Лазерный факел распространяется в направлении внешней среды, при этом максимум высвечивания ЭЛФ для всех исследованных материалов происходил на высоте менее 1 мм. Характерная скорость распространения переднего плазменного образования на высоте 2 мм от поверхности мишени составляет 4–14 км/с в зависимости от типа металлической мишени.

Следует отметить, что применение для лазерной обработки металлов наносекундных лазерных импульсов с интенсивностью 10^8 Вт/см² более эффективно, поскольку в этом случае ЭЛФ практически не взаимодействует с падающим излучением вследствие высокой прозрачности формирующегося плазменного образования. В случае повышения плотности мощности излучения значительная часть энергии действующего импульса не доходит до поверхности мишени и расходуется на повышение параметров образующейся плазмы. Протекание конденсационных процессов в ЭЛФ, образующихся при данных условиях воздействия, делает лазерную эрозию привлекательной с точки зрения реализации высокопроизводительных процессов формирования наноразмерных частиц металлов.

Список литературы

1. Goncharov V.K., Kozadaev K.V. and Shchegrikovich D.V. Investigation of noble metals colloidal systems formed by laser synthesis at air//Advances in Optical Technologies. Vol.2012. Article ID 907292. doi: 10.1155/2012/907292.
2. Гончаров В.К., Козадаев К.В., Шиман Д.И., Щегрикович Д.В. Формирование и исследование оптических сред, содержащих золотые наночастицы//ИФЖ. 2012. Т.85, №1. С. 38 – 42.
3. Goncharov V.K., Kozadaev K.V. and Shchegrikovich D.V. Laser synthesis of optical media with silver nanoparticles by nanosecond pulses at air//Optical memory & Neural Networks (Information Optics). 2011, Vol.20, No4. Pp. 255 – 259.
4. Кикоин И.К. Таблицы физических величин. М.: Атомиздат, 1976.
5. Гончаров В.К., Козадаев К.В., Щегрикович Д.В. Начало конденсации в эрозионных факелах металлов при высокоинтенсивном субмикросекундном лазерном воздействии//ИФЖ. 2011. Т.84, №4. С. 723 – 728.
6. Гончаров В.К., Козадаев К.В. Формирование конденсированной фазы металлов при воздействии на них субмикросекундных лазерных импульсов//ИФЖ. 2010. Т.83, №1. С. 80 – 84.
7. Козадаев К.В. Изменение рельефа металлических мишеней под действием субмикросекундных лазерных импульсов высокой плотности мощности//Перспективные материалы. №6, 2011. С 71 – 78.

With the help of laser probing method the time dependences of plasma transparency coefficient ELJ, integral irradiation and scattering part of probing beam were defined for the case of acting of intensive nanosecond laser pulses at metals.

Гончаров В.К., зав. лабораторией НИИПФП им. А.Н.Севченко БГУ, д. ф.-м. н., профессор, Минск, Беларусь.

Козадаев К.В., с.н.с. НИИПФП им. А.Н.Севченко БГУ, к. ф.-м. н., доцент, Минск, Беларусь.

Щегрикович Д.В., м.н.с. НИИПФП им. А.Н.Севченко БГУ, Минск, Беларусь.

СТРУКТУРА ПОВЕРХНОСТИ НАНОРАЗМЕРНЫХ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ ПЛЕНОК ОСАЖДЕННЫХ В ВАКУУМЕ ЛАЗЕРНО-ПАЗМЕННЫМ МЕТОДОМ

Получены наноразмерные пленки алюминия, цинка и меди лазерно-плазменным методом в вакууме. Определены концентрации металлических частиц на поверхности подложки в зависимости от плотности мощности лазерного излучения для различных металлов. Получено распределение частиц по размерам на поверхности подложки. Найдены режимы осаждения пленок, на поверхности которых отсутствуют частицы металла.

Введение. Один из современных способов модификации изделий машиностроения и приборостроения - уменьшение геометрических размеров их элементов. Многие из них включают в себя тонкопленочные покрытия, характеристики которых можно менять, варьируя их толщину. Покрывают изделия тонкими металлическими пленками и сплавами для того, чтобы придать их поверхностям физико-химические и механические свойства, отличные от свойств металлизированного (исходного) материала. Металлизацию применяют для защиты изделий от коррозии, износа, в декоративных и др. целях.

Современные требования к изделиям микроэлектроники ведут к необходимости повышения рабочих частот изделий и увеличения плотности размещения элементов. Это в свою очередь требует уменьшения ширины дорожек внутренних соединений. Поэтому получение тонких металлических однородных покрытий является актуальной задачей. Технологии, используемые в микросхемах, требуют формирования пленочных структур нанометровой и субнанометровой толщины. Метод импульсного лазерного напыления позволяет решать задачи напыления таких пленок.

Импульсное лазерное напыление позволяет напылять чрезвычайно тонкие сплошные пленки (менее 10 нм). Метод импульсного лазерного напыления обеспечивает сохранение исходного состава мишени при напылении многокомпонентных веществ. Лазерное напыление очень технологично, так как позволяет использовать мишени любого размера и формы. К основным достоинствам лазерного напыления по сравнению с другими методами можно отнести точный контроль толщины напыляемой пленки. Кроме того напыление в вакууме обеспечивает чистоту технологического процесса.

Наиболее широкое применение в лазерном напылении тонких пленок нашли твердотельные лазеры с модулированной добротностью.

Для многих технологических процессов имеет важное значение осаждение однородных металлических покрытий, при которых будет формироваться пленка с минимальным содержанием застывших на ее поверхности жидких капель. Формирование жидкокапельной фазы в лазерных эрозионных факелах металлов может происходить за счет трех механизмов. Самые крупные жидкие капли формируются за счет гидродинамического механизма [1 – 3]. Их размер зависит от многих факторов (пространственно-временной формы лазерных импульсов, условий фокусировки, чистоты материала мишени и разновидности металлов). Диаметр частиц находится в пределах 1 – 100 мкм. За счет объемного парообразования формируются частицы материала мишени, в зависимости от условий лазерного воздействия, диаметром 0,04 – 1 мкм [4].

При облучении металлических мишеней одиночными лазерными импульсами короткой длительности в эрозионном лазерном факеле в основном формируются частицы материала мишени за счет конденсации продуктов разрушения [5]. Их диаметр обычно составляет 40-60 нм.

При воздействии на металлические мишени лазерными импульсами в частотном режиме за счет синергетических процессов в эрозионном лазерном факеле могут формироваться частицы конденсированной фазы материала мишени за счет всех трех механизмов. При этом преобладание того или другого механизма зависит от условий воз-

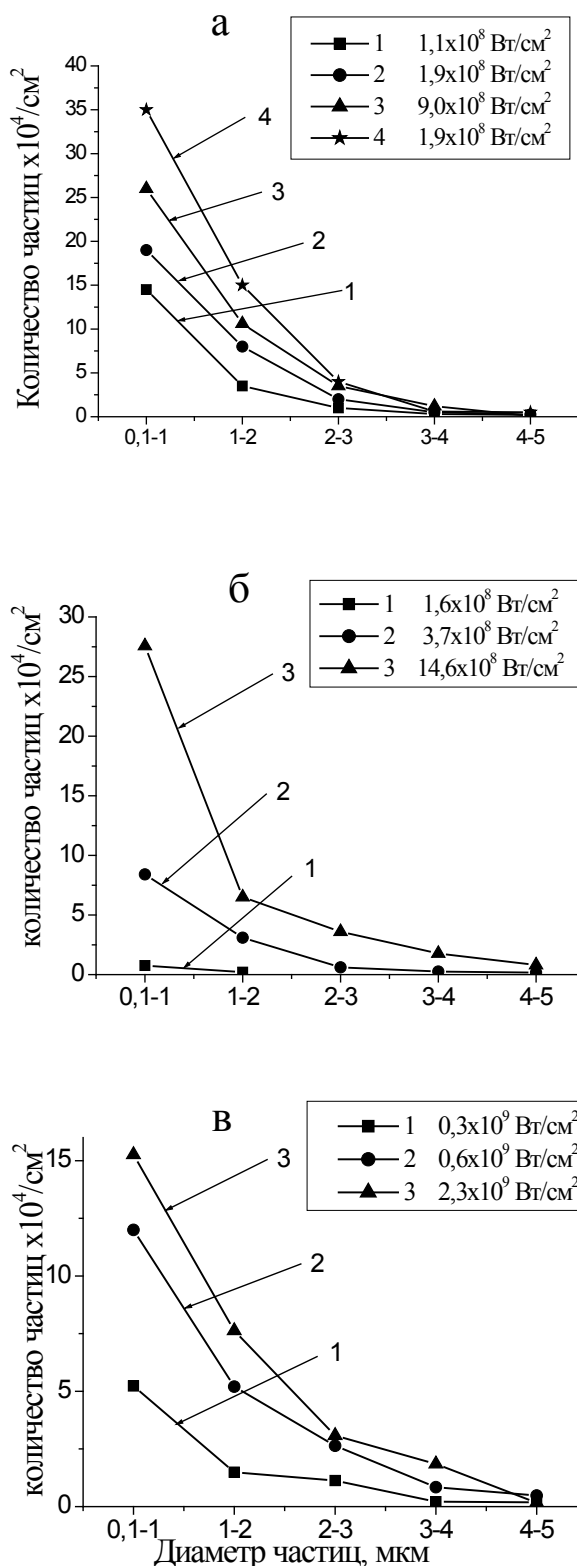


Рисунок 1. - Распределение частиц по размерам при различных средних плотностях мощности воздействующего лазерного излучения: а – цинк, б – алюминий, в – медь. 1-3 – расстояние между подложкой и мишенью 10 см; 4 – 2,5 см.

действия (энергии в отдельном лазерном импульсе, фокусировки, частоты лазерных импульсов, скорости перемещения лазерного луча по поверхности мишени и др.)

В данной работе ставилась задача подобрать режимы облучения алюминиевой, медной и цинковой мишени таким образом, чтобы получить эрозионные лазерные факелы с минимальным содержанием жидкокапельных частиц.

Экспериментальное оборудование. 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 равнялась 10 Гц. Длительность осаждения составляла 1 час. Мишени устанавливались под углом 45° к оси лазерного пучка. В качестве подложек использовался кремний и стекло. Осаждение проводилось в вакууме при давлении остаточных газов $\sim 10^{-3}$ Па. Подложки располагались параллельно поверхности графитовой мишени. Расстояние между подложкой и мишенью составляло 10 см. Мишень вращалась со скоростью 2 об/мин, чтобы предотвратить образование глубокого кратера на поверхности мишени, что может сказаться на пространственной форме эрозионного факела. Эрозионный след на мишени представлял собой окружность диаметром 15 – 20 мм с различной шириной следа в зависимости от типа мишени и условий эксперимента.

Мишени были изготовлены из технически чистого цинка, алюминия и меди.

Структура поверхности пленок изучалась на растровых электронных микроскопах LEO 1455 VP фирмы Carl Zeiss Германия, Hitachi S-4800 Япония. Толщина покрытий определялась при помощи профилометра Talystep (США).

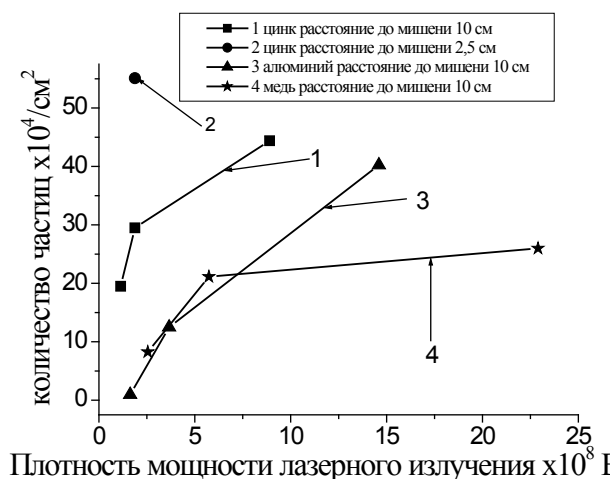


Рисунок 2 – Зависимость количества частиц на квадратный сантиметр от плотности мощности воздействующего лазерного излучения для различных металлов: 1,2 – цинк, 3 – алюминий, 4 – медь; 1,3,4 – расстояние между подложкой и мишенью 10 см, 2 – расстояние между подложкой и мишенью 2,5 см.

на рисунке 1 представлены распределения частиц по размерам при различных условиях экспериментов. Как видно из рисунка количество частиц уменьшается с увеличением размеров. На рисунке представлены распределения частиц размером 0,1 – 5 мкм. В реальности на снимках встречаются частицы больших размеров, но достаточно редко. Частиц с размером меньшим 0,1 мкм значительно больше. Эти частицы увеличивают скорость роста осаждаемого покрытия и не влияют на равномерность поверхности осаждаемого покрытия. Из рисунка 1 видно, что при уменьшении плотности мощности воздействующего на мишень лазерного излучения количество частиц на поверхности пленки уменьшается.

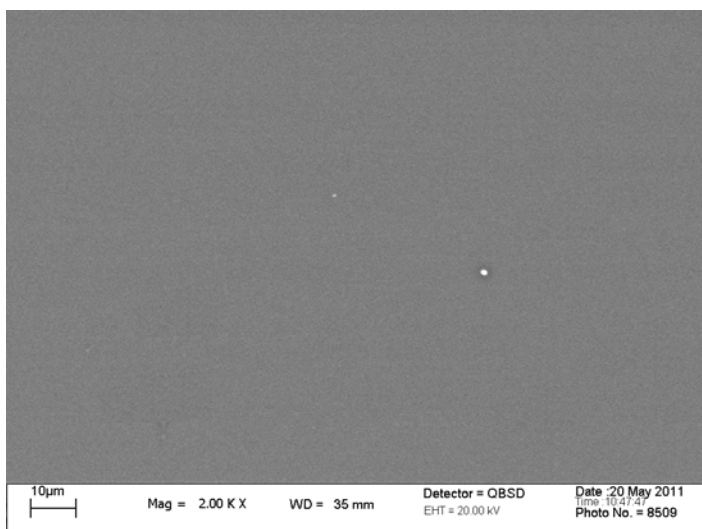


Рисунок 3 – изображение поверхности цинковой пленки. Осажденной при плотности мощности воздействующего лазерного излучения $1,1 \cdot 10^8$ Вт/см²

Обсуждение результатов.

Наночастицы жидкокапельной фазы материала мишени, формирующиеся в эрозионном факеле за счет объемного парообразования, а также за счет конденсационного механизма увлекаются потоком ионов и атомов материала мишени. При попадании на поверхность подложки они формируют нанопленку.

Частицы, сформированные в эрозионном факеле за счет гидродинамического механизма, имеют достаточно крупные размеры (1-15 мкм) и значительно меньшие скорости по сравнению со скоростью атомов и ионов. Эти частицы, достигая подложки, ухудшают структуру поверхности осаждаемой пленки.

В связи с этим необходимо найти условия осаждения металлических пленок с минимальным содержанием крупных частиц на их поверхности. На

Все эти эксперименты проведены при одном расстоянии между подложкой и лазерной мишенью равном 10 см. Для проверки влияния расстояния от подложки до мишени на количество осаждаемых на поверхности пленки частиц был сделан дополнительный эксперимент. Было установлено расстояние между мишенью и подложкой 2,5 см для цинковой мишени. Как показывает рисунок 1 а при уменьшении расстояния между подложкой и поверхностью лазерной мишени количество крупных частиц резко увеличивается. Это может быть связано с тем, что крупные части-

цы, сформированные за счет гидродинамического механизма разлетаются в эрозионном факеле под меньшими углами относительно поверхности мишени, чем остальные продукты разрушения [6]. При увеличении расстояния от поверхности мишени до подлож-

ки их концентрация в факеле уменьшается. При увеличении расстояния от подложки до мишени более 10 см количество крупных частиц уменьшается, но и скорость осаждения металлических пленок уменьшается.

На рисунке 2 приведена зависимость общего количества частиц на поверхности пленки для различных металлов в зависимости от плотности мощности воздействующего лазерного излучения.

В настоящей работе были найдены условия осаждения пленок, на поверхности которых практически отсутствуют частицы материала мишени рисунок 3.

Заключение

Определены плотности мощности воздействующего лазерного излучения при которых можно пучить бескапельные наноразмерные металлические пленки. Для цинка она составляет $1,1 \cdot 10^8$ Вт/см², для алюминиевой мишени такие пленки получаются при плотности мощности лазерного излучения $1,6 \cdot 10^8$ Вт/см², а для медной $2,3 \cdot 10^8$ Вт/см².

Aluminium, zinc and copper nanodimensional films have been produced by a the laser-plasma method in vacuum. The concentration of metal particles on a substrate surface has been determined depending on the laser radiation intensity for different metals. The particles dimensional distribution on a substrate surface has been determined. The deposition regimes of the films are found where there are no particles on a surface of a metal.

Список литературы

1. Уляков, П.И. Некоторые закономерности разрушения твердых сред излучением ОКГ / П.И.Уляков // ЖЭТФ. - 1967. - Т.52, Вып. 3. - С. 820 - 831.
2. Путренко, О.И Исследование световой эрозии металлов в течение импульса генерации ОКГ / О.И Путренко, А.А.Янковский // ЖПС. - 1971. - Т. 15, № 4. - С.596 – 604.
3. Анисимов, С.И Действие лазерного излучения большой мощности на металлы / С.И.Анисимов, Я.А.Имас, Г.С.Романов, Ю.В.Ходыко. - М.: Изд-во Наука, 1970. – 272 с.
4. Гончаров, В.К. Воздействие на металлы высокоэнергетичных импульсов излучения неодимового лазера различной пространственно-временной формы / В.К.Гончаров // ИФЖ. – 2001. - Т. 74, № 5. - С.87 – 97.
5. Гончаров, В.К. Формирование конденсированной фазы металлов при воздействии на них субмикросекундных лазерных импульсов / В.К. Гончаров, К.В. Козадаев // ИФЖ. – 2010. - Т. 83, № 1. – С.1 – 5.
6. Гончаров, В.К. Эрозионный лазерный факел в свете стробирующего излучения вспомогательного лазера / В.К.ончаров, К.В.Козадаев, М.В.Пузырев, Д.Л.Славашевич // ИФЖ. – 2008. - Т. 81, № 2. – С.211 – 215.

Гончаров В.К., зав. лабораторией НИИПФП им. А.Н.Севченко БГУ, д.ф.-м.н., профессор.

Гусаков Г.А., в.н.с. НИИПФП им. А.Н.Севченко БГУ, к.ф.-м.н., E-mail: rhusakou@rambler.ru

Пузырев М.В., в.н.с. НИИПФП им. А.Н.Севченко БГУ, к.ф.-м.н., E-mail: puzyrev@bsu.by

Исмаилов Д.Р., н.с. НИИПФП им. А.Н.Севченко БГУ, E-mail: doom-er.samoiloff@gmail.com.