

2. Hoffmann, C. Cold Atmospheric Plasma: methods of production and application in dentistry and oncology / C. Hoffmann, C. Berganza, J. Zhang // Medical Gas Research. – 2013. – P. 21.

3. Пат. WO 2015/071746 A1, МПК H05H 1/24, H05H 1/30. Method of generating an atmospheric plasma jet and atmospheric plasma minitorch device / Patelli, A., Verga Falzacappa, E., Scopece, P., Pierobon, R., Vezzu, S. Оpubл. 21.05.2015. – 45 с.

4. Пат. US 2011/0298376 A1, МПК H05H 1/30. Apparatus and method for producing plasma / Kanegae, M., Kato K., Onoe K., Fukuoka D. Оpubл. 08.12.2011. – 36 с.

А.А. Хмыль¹, Н.Н. Федосенко², А.Н. Купо²

¹УО «Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники», Минск, Беларусь

²УО «Гомельский государственный университет имени Франциска Скорины», Гомель, Беларусь

ВЛИЯНИЕ АКТИВИРУЮЩЕГО ЛАЗЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ НА КИНЕТИКУ ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКОГО ОСАЖДЕНИЯ СЕРЕБРА

Введение

Среди различных методов формирования функциональных элементов и поверхностных структур электронной техники одним из перспективных и непрерывно развивающихся является метод электрохимической обработки. В последние годы научный интерес вызывает электрохимическая обработка (как осаждение, так и травление) с применением активирующего лазерного излучения. Использование лазерного излучения в электрохимических реакциях обеспечивает существенное локальное увеличение (в 5–10 раз) скорости процесса, позволяет снизить механические напряжения и концентрацию микродефектов в получаемых покрытиях. В зоне воздействия ЛИ и её ближайшей окрестности формируются локальные осадки металлов, при этом их свойства принципиально отличаются от свойств электрохимического покрытия, осаждаемого вне зоны термического влияния лазерного излучения [1, 2].

Локальное безмасочное лазерное электрохимическое осаждение (ЛЭО) применяется при изготовлении контактных площадок, формировании объёмных выводов на рамках микросхем, закреплённых на ленточных носителях, деталях электромеханических микрореле и т. д. Метод лазерной электрохимии обеспечивает развитие новых технологий изготовления непланарных сеток, филь-

тров, дифракционных решёток, покрытия внутренней поверхности узких отверстий, формирования межслойных соединений в печатных платах и микросхемах. Активация электрохимических процессов лазерным излучением способствует повышению производительности труда за счёт увеличения процента выхода годных изделий, экономии материалов, что особенно важно при формировании покрытий из драгоценных металлов, а также экологической безопасности.

Использование метода электрохимического осаждения металлов в условиях лазерной активации, кроме того, что позволяет обеспечить локальное ускорение процесса электролиза, но и предоставляет возможность формировать осадки с заданными эксплуатационными характеристиками. Такой эффект достигается за счёт относительной технической простоты и возможности варьировать параметры ЛИ в широких пределах. Исследование механизма формирования локальных осадков методом ЛЭО лежит в основе создания токонесущих элементов электронной техники с заданными электрическими и микромеханическими свойствами.

1. Результаты эксперимента и моделирование

Для активации в процессе ЛЭО серебра использовалось лазерное излучение (ЛИ) с длиной волны $\lambda = 1,06$ мкм, длительностью импульса $\Delta t = 4 \cdot 10^{-3}$ с, частотой следования импульсов $f = 5$ Гц. Экспериментально, посредством использования микротермопар [3], получены радиально-временные распределения температуры на поверхности медного катода вблизи локального осадка серебра в диапазоне плотности мощности (ПМ) ЛИ $W = (1-5) \cdot 10^{10}$ Вт/м². На рисунке 1 представлена динамика изменения температуры ΔT на поверхности катода на удалении 1 мм от центра лазерного «пятна» при различных ПМ ЛИ с течением времени τ .

Непосредственно в процессе формирования электрохимического покрытия, одновременно с измерениями температуры, используя оптическую систему «СОК-2», сопряжённую с компьютером, проводились наблюдения изменения радиуса локального осадка. На рисунке 2 представлена зависимость стационарного радиуса локального осадка серебра r_{∞} от ПМ ЛИ W . Следует отметить, что с увеличением ПМ увеличивается и стационарный радиус локального осадка, по достижении которого дальнейшее воздействие ЛИ приводит к деградации свойств электрохимического покрытия, и, в конечном итоге, к лазерной деструкции электрохимического покрытия и подложки.

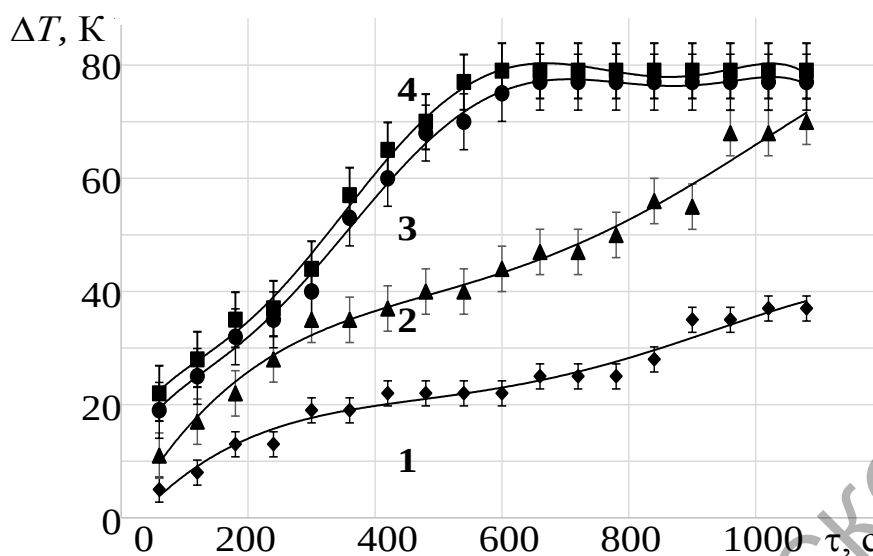


Рисунок 1 – Динамика изменения температуры на заданном удалении от центра лазерного пятна при ЛЭО серебра:
 1 – $W = 1,0 \cdot 10^{10} \text{ Вт/м}^2$; 2 – $W = 2,0 \cdot 10^{10} \text{ Вт/м}^2$;
 3 – $W = 3,0 \cdot 10^{10} \text{ Вт/м}^2$; 4 – $W = 4,0 \cdot 10^{10} \text{ Вт/м}^2$.
 Расстояние от центра лазерного пятна $r = 0,1 \text{ см}$

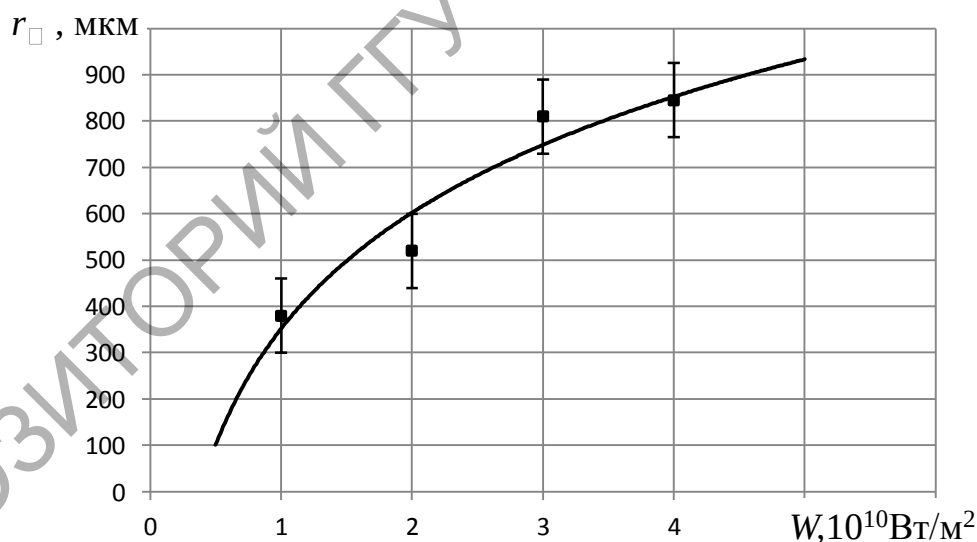


Рисунок 2 – Зависимость стационарного радиуса локального осадка от ПМ ЛИ

На рисунке 3 представлена зависимость стационарной температуры ΔT_{∞} от ПМ ЛИ на удалении $r = 0,1 \text{ см}$ от центра зоны термического влияния. При этом зависимости, представленные на рисунках 2 и 3 коррелируют между собой. Анализируя информацию, представленную на этих рисунках, можно от-

метить, что наибольшая стационарная температура катода, определяемая значением ПМ ЛИ, соответствует наибольшему стационарному радиусу локального осадка.

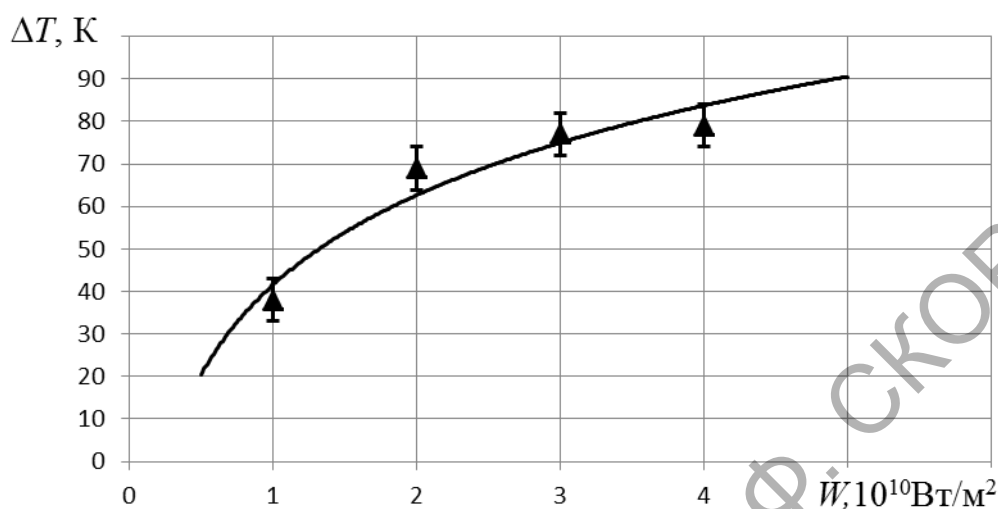


Рисунок 3 – Зависимость стационарной температуры вблизи границы локального осадка от ПМ ЛИ

На основании теории регулярного нагрева Г.М. Кондратьева можно считать, что при достаточно больших, но конечных временах τ воздействия на поверхность ЛИ справедливо соотношение [4]:

$$\Delta T(r, \tau) = \Delta T(r) \cdot (1 - e^{-m\tau}), \quad (1)$$

где m – темп нагрева.

С использованием соотношения (1) проведена аппроксимация экспериментальных временных зависимостей температуры вблизи границы локального осадка при различных значениях ПМ ЛИ. Определены темпы нагрева m в указанном диапазоне ПМ W . Установлено, что увеличение темпа нагрева с ростом ПМ ЛИ отражает характер увеличения стационарного радиуса локального осадка при увеличении W . Резкое увеличение темпа нагрева, приводящее к быстрому росту радиуса локального осадка, соответствует диапазону ПМ $\sim (2,5-3,5) \cdot 10^{10} \text{ Вт/м}^2$. Выявленная закономерность указывает на то, что в данном диапазоне W снимается так называемое диффузионное ограничение скорости процесса осаждения металла, связанное с транспортировкой ионов к катоду из объема электролита. В области больших плотностей мощности скорость всего процесса определяется особенностями формирования твердой фазы локального осадка, т.е. скоростью разряда ионов на границе «катод-электролит».

Полученные данные о закономерностях «уширения» локального осадка при различных ПМ позволили проанализировать кинетику этого процесса. Локальный электрохимический осадок в условиях лазерной активации форми-

руется в результате суперпозиции двух конкурирующих процессов: адсорбции и кристаллизации, с одной стороны, и десорбции – с другой. Кинетические закономерности указанных процессов характеризуются определенной скоростью и константами скорости α_1 и α_2 [5]. Полагая, что указанные процессы являются процессами первого порядка, можно для радиуса локального осадка записать:

$$\ln \frac{r^*}{r^* - r} = \frac{\tau}{\zeta}, \quad (2)$$

где r^* – радиус стационарного локального осадка, r – его радиус в момент времени τ , $\zeta = \frac{1}{\alpha_1 + \alpha_2}$ – время, по истечении которого стабилизируются температура

и радиус локального осадка (время релаксации). Используя выражение (2) и экспериментальные данные о динамике радиуса локального осадка серебра было рассчитано время релаксации роста локального осадка в указанном диапазоне ПМ ЛИ. Показано, что с увеличением ПМ ЛИ время релаксации уменьшается, что согласуется с экспериментом. Этот факт, в частности, подтверждает вывод о замене лимитирующей стадии электрохимического процесса формирования локального осадка при изменении ПМ ЛИ.

Заключение

Таким образом, получены следующие результаты:

- проанализирован механизм взаимодействия ЛИ инфракрасного диапазона с металлами на примере ЛЭО серебра на медные подложки;
- проведен анализ динамики роста локального осадка, позволивший определить влияние ПМ ЛИ на кинетику его формирования.
- экспериментально установлено, что стационарная температура в зоне воздействия ЛИ стабилизируется в течение $\sim 10^{-2} - 10^{-3}$ с;
- с помощью формулы (1) проведена аппроксимация экспериментальных временных зависимостей температуры в окрестности локального осадка при различных ПМ ЛИ, определены темпы нагрева и время релаксации;
- установлено, что увеличение плотности мощности до $\sim 3,5 \cdot 10^{10}$ Вт/м² снимает ограничение скорости осаждения серебра по диффузионному механизму, а в области $(3,5-5,0) \cdot 10^{10}$ Вт/м² определяется скоростью разряда катионов.

Литература

1. Кочемировский, В.А. Изучение возможности протекания реакции лазерно-индуцированного осаждения меди в конденсированных средах / В.А Кочемировский, И.И Тумкин, Е.В Шишкова // Современные проблемы науки и образования. – 2014. – С. 68–79.

2. Влияние лазерного излучения на теплообменные процессы при электрохимическом осаждении серебра / А.А. Хмыль [и др.] // Известия НАН Беларуси. Сер. физико-технич. наук. – 2006. – № 2. – С. 17–20.

3. Федосенко, Н.Н. Лазерная электрохимическая модификация поверхности материалов электронной техники / Н.Н. Федосенко, В.Г. Шолох, А.Н. Купо // Известия Гомельского государственного университета имени Ф. Скорины. – 2006. – № 6(39). – Ч. 1. – С. 144–147.

4. Кондратьев, В.М. Регулярный тепловой режим / В.М. Кондратьев. – Москва: Гостехиздат, 1954. – 276 с.

5. Дамаскин, Б.Б. Электрохимия: учебник / Б.Б. Дамаскин, О.А. Петрий, Г.А. Цирлих. – Москва: Химия, 2006. – 672 с.

А.В. Хомченко

ГУ ВПО «Белорусско-российский университет», Могилев, Беларусь

ВОЛНОВОДНАЯ СПЕКТРОСКОПИЯ ТОНКИХ ПЛЕНОК И АДСЛОЕВ НА ИХ ПОВЕРХНОСТИ

Введение

Бурное развитие нанотехнологий стимулирует исследование свойств пленок, толщина которых составляет десятки и даже единицы нанометров. Тонкие пленки широко используются в опто- и микроэлектронике, оптике и нанофотонике. Получение сверхтонких пленок не вызывает затруднений. Качество зависит от выбранного метода, но особенности фазовых и структурных состояний вещества в тонких пленках создают большие технологические и эксплуатационные трудности, связанные с недостаточной их воспроизводимостью и возможной нестабильностью свойств во времени. Таким образом, существует задача измерения параметров тонких пленок и наноразмерных слоев. К настоящему времени разработан ряд способов и методик измерения и контроля параметров тонкопленочных структур. Одним из эффективных методов такого контроля наряду с эллипсометрией [1] и рефлектометрией [2] является волноводная спектроскопия [3]. В последнее время появился ряд работ, расширяющих возможности волноводного метода [4, 5].

В настоящей работе изложены основные принципы и техника эксперимента измерения спектральных характеристик на основе пространственной фурье-спектроскопии волноводных мод [3]. Обсуждаются возможности и особенности измерения коэффициента поглощения (экстинкции) k , показателя преломления n , толщины пленки d и исследования спектральных свойств тонких пле-