

УДК 621.357.7:621.381

**ОСОБЕННОСТИ МИКРОСТРУКТУРЫ ПОВЕРХНОСТИ МЕДИ,
СФОРМИРОВАННОЙ ЛАЗЕРНЫМ ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКИМ МЕТОДОМ**

*канд. физ.-мат. наук, доц. Н.Н. ФЕДОСЕНКО, канд. техн. наук, доц. В.Г. ШОЛОХ, А.Н. КУПО
(Гомельский государственный университет им. Франциска Скорины)*

Исследованы микроструктура, топология и рельеф поверхности медной фольги толщиной 30 мкм в зоне термического воздействия лазерного излучения, сформированной в результате лазерного электрохимического травления при различных значениях энергии в импульсе и частоте их следования. Проанализирована динамика профиля поверхности в зоне термического воздействия лазерного излучения. Проведено моделирование температурного поля в окрестности лазерного пятна с учетом импульсного режима воздействия. Определено радиальное распределение температурных градиентов при различных значениях частоты следования лазерных импульсов.

Развитие технологии создания элементной базы для электронной техники требует использования нетрадиционных методов формирования поверхностных нано- и микроструктур. Одним из них является метод лазерного электрохимического осаждения (или травления). Преимущества лазерной стимуляции состоят в возможности острой фокусировки лазерного излучения, обеспечивающей локальное воздействие, а также в простоте варьирования технологических параметров лазерного излучения в широких пределах. Локальность воздействия лазерного излучения позволяет формировать на поверхности металлов особенности рельефа (локальные осадки либо ямки травления) микронных размеров, что представляет практический интерес для технологии создания проводящих элементов микроэлектронных схем. Воздействие лазерного излучения на процесс электрохимического формирования микроструктуры поверхности позволяет наряду с увеличением скорости осаждения (травления) металлов улучшить функциональные свойства модифицируемой поверхности, добиться экономии материалов и др. [1 - 3].

Электрохимическое травление представляет собой сложный физико-химический процесс, и лазерная стимуляция этого процесса обеспечивает ускорение различных стадий электрохимического травления в разной мере. Эффективность стимулирующего воздействия зависит от технологических параметров лазерного излучения, от внутренних свойств электролитической системы, от электрических параметров процесса и т.д. Возможность варьирования как энергетических, так и временных параметров стимулирующего лазерного излучения при модификации поверхности данным методом открывает перспективу управления структурными и в целом физическими свойствами формируемых функциональных элементов. Создание технологий, основанных на использовании этого метода, требует изучения механизма лазерного электрохимического травления, а также исследования микроструктуры поверхности в зоне термического воздействия при различных технологических параметрах лазерного излучения.

В данной работе исследованы структурные особенности поверхности медной фольги толщиной 30 мкм в зоне термического воздействия лазерного излучения, сформированной в результате лазерного электрохимического травления. В эксперименте использовался лазер с длиной волны 1,06 мкм и длительностью импульса $4 \cdot 10^{-3}$ с. Энергия в импульсе варьировалась в пределах 1 ... 2,5 Дж, частота следования импульсов - в интервале 0,4...2,2 Гц. Радиус лазерного пятна на поверхности фольги составлял 10^{-4} м. Толщина слоя электролита над поверхностью фольги составляла $2 \cdot 10^{-3}$ м.

Нами получены микрофотографии поверхности медной фольги в зоне лазерного пятна в начальный период модификации поверхности, а также в его окрестности в различные моменты времени, зарегистрированы профили поверхности в зоне термического воздействия лазерного излучения, а также исследована топология сформированной поверхности.

Анализ экспериментальных результатов показал, что на начальной стадии обработки в зоне лазерного пятна происходит разрушение поверхностного окисного слоя и формирование пучности рельефа, высота которого составляет несколько микрометров. Кривая 1 на рис. 1 иллюстрирует профиль поверхности фольги, сформированный в зоне термического воздействия в течение 60 с при энергии лазерного излучения 1 Дж в импульсе и частоте следования импульсов 0,4 Гц. Дальнейшее воздействие лазерного излучения приводит к удалению окисного слоя и формированию ямки травления со сложным профилем поверхности. Кривые 2 и 3 отражают профиль поверхности, сформированный при указанных выше параметрах лазерного излучения в течение 160 и 260 с соответственно.

Как видно из рис. 1, одновременно с формированием лунки травления в зоне лазерного пятна в ее окрестности протекает электрохимическое травление, стимулированное тепловым полем, созданным лазерным источником. В результате формируется пологое углубление в виде кольца, ширина которого составляет примерно 10^{-4} м.

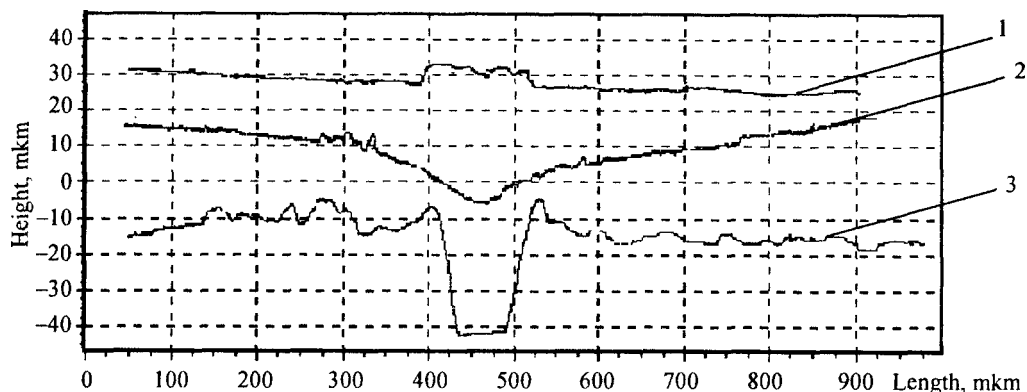


Рис. 1. Профили поверхности медной фольги, сформированной в зоне термического воздействия лазерного излучения с энергией 1 Дж в импульсе и частотой следования импульсов 0,4 Гц в течение 60 с (1), 160 с (2), 260 с (3)

На рис. 2 представлена микрофотография поверхности образца, профиль которой отражен кривой 3 на рис. 1, где четко видно, что зона электрохимического травления имеет микрократерную структуру.

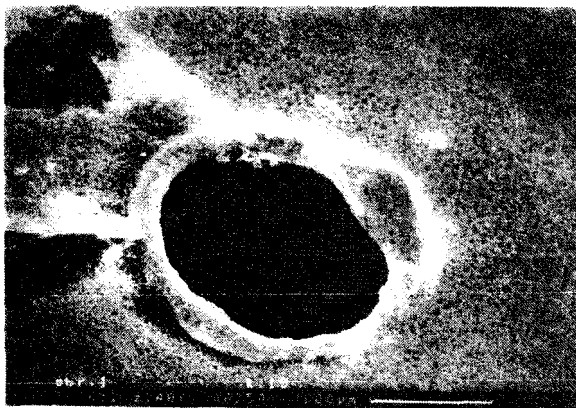


Рис. 2. Микроструктура поверхности медной фольги в зоне термического воздействия лазерного излучения

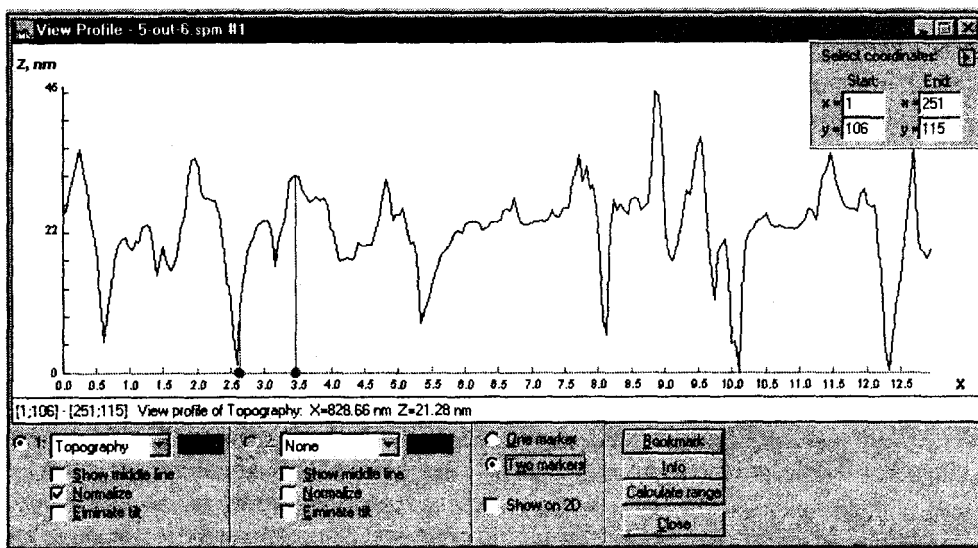
Анализ механизма электрохимического травления позволил выявить природу указанных микроструктурных особенностей. Движущая сила для реакций окисления и восстановления в электрохимическом процессе определяется потенциалами окисления и восстановления. Однако на кинетику общей реакции обычно оказывают влияние такие факторы, как анодная и катодная поляризация, перенос носителей заряда, диффузия и т.д. [4]. Потенциал растворения твердого тела зависит от конкретной формы локальных катодной и анодной поляризационных кривых и определяется их пересечением. Оба процесса (катодный и анодный) являются активированными, и их скорости обычно выражаются с помощью соотношений Таффеля.

Ускорение электродных реакций при воздействии лазерного излучения инфракрасного диапазона, как правило, основано на фототермическом механизме стимулирования электролиза. Термический сдвиг равновесного потенциала вызывает ускорение растворения, что и обеспечивает формирование наблюдаемого нами углубления в зоне электрохимического травления.

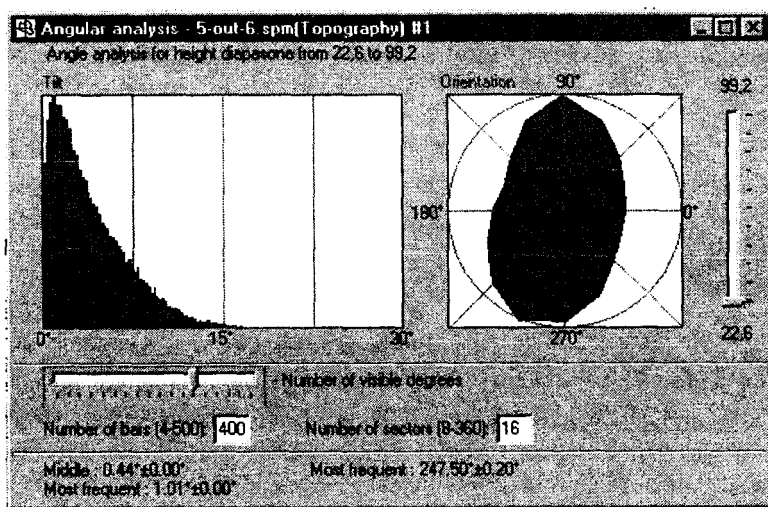
Микрократерный характер поверхности этой зоны является следствием неравномерного (селективного) электрохимического растворения и объясняется следующим образом. Тепловое воздействие лазерного излучения обеспечивает активацию перемещения точечных структурных дефектов и дислокаций, расположенных на поверхности кристалла и в приповерхностных слоях, обуславливает нарушение однородности потенциального рельефа поверхности. Этот процесс приводит к тому, что определенные участки поверхности ведут себя преимущественно как аноды или катоды вследствие вариаций плотности поверхностных дефектов. Места скопления дислокаций характеризуются сниженным значением фазовой составляющей перенапряжения анодного процесса [5]. Поэтому они действуют в основном как аноды, являясь «отрицательными зародышами кристаллизации». Рассмотренные явления приводят к увеличению скорости электрохимического растворения в зонах скопления поверхностных дефектов и, как следствие, к образованию дислокационных ямок травления (микрократеров).

Исследование топологии поверхности в микрократерной зоне позволило получить более подробную информацию о структурных особенностях модифицируемой поверхности. На рис. 3 приведены

рельеф этой поверхности и угловая диаграмма, характеризующая пространственную ориентацию межзеренных границ. Из этих данных следует, что среднее расстояние между соседними микрократерами составляет примерно 3 мкм, а их средняя глубина - примерно 30 нм. Угловые диаграммы свидетельствуют о том, что ориентация граней кристаллитов близка к нормали (наиболее вероятный угол с нормалью составляет $\sim 1^\circ$) и описывается достаточно узким угловым распределением. Ориентация граней кристаллитов в плоскости анализируемой поверхности обладает некоторой анизотропией, что, по нашему мнению, связано с наличием температурного градиента как фактора, характеризующего активирующее действие формирования микрократерной структуры.



a)



б)

Рис. 3. Параметры топологии поверхности медной фольги в микрократерной зоне:
а - рельеф поверхности; б - угловая диаграмма

Далее в работе проведен сравнительный анализ площадей микрократерной зоны для образцов, полученных при различных значениях энергии лазерных импульсов и частоты их следования. Установлено, что при увеличении частоты следования импульсов с заданной энергией, во-первых, происходит уменьшение количества энергии лазерного излучения, необходимого для сквозного травления фольги, во-вторых, уменьшение площади микрократерной зоны, образовавшейся за время сквозного травления. Увеличение энергии в импульсе лазерного излучения при заданной их частоте приводит к качественно идентичному результату.

Поскольку, как было сказано выше, активирующим фактором формирования поверхности меди является тепловое воздействие, создаваемое лазерным источником, полезным для обсуждения наблюдаемых закономерностей является анализ температурного поля в окрестности лазерного пятна. В работе

проведено математическое моделирование температурного поля в окрестности лазерного пятна. Для описания температурного поля использовалась модель нагрева тонкой пластины круговым импульсным источником теплоты, равномерно распределённым в круге радиусом a , равным 10^{-4} м [6], что соответствует условиям эксперимента. Нами рассчитаны градиенты температуры в зоне от a до $3a$, в предположении радиальной симметрии температурного поля, в рамках которой формируется микрократерная зона. Результаты расчетов, выполненных при различных частотах лазерного излучения для моментов времени, соответствующих 30 импульсам, приведены на рис. 4.

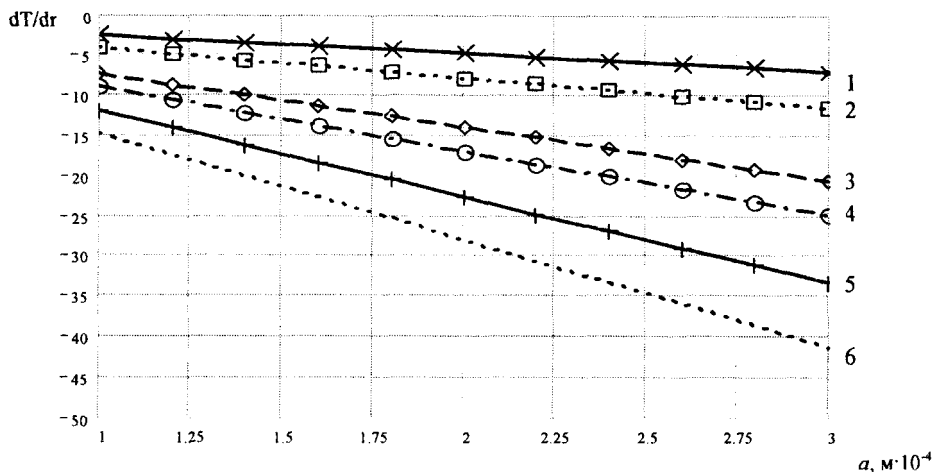


Рис. 4. Радиальное распределение температурных градиентов при частоте следования лазерных импульсов:
1 – 0,4 Гц; 2 – 0,6 Гц; 3 – 1 Гц; 4 – 1,2 Гц; 5 – 1,6 Гц; 6 – 2 Гц

Температурные градиенты в соответствии с законом Фурье отражают интенсивность тепловых потоков на поверхности материала. Как видно из рис. 4, с увеличением частоты следования импульсов один и тот же тепловой поток в зоне термического воздействия реализуется при меньшем удалении от лазерного пятна. Этот результат согласуется с экспериментально установленным уменьшением площади микрократерной зоны при увеличении частоты следования лазерных импульсов.

Таким образом, установлена динамика формирования профиля поверхности медной фольги в процессе лазерного электрохимического травления, проанализирован механизм формирования микрократерной зоны, определены параметры топологии поверхности в этой зоне. Проанализировано влияние технологических параметров лазерного излучения на структурные особенности поверхности меди. Установлено, что при увеличении частоты следования импульсов с заданной энергией, а также с увеличением энергии в импульсе при заданной частоте их следования в исследуемом диапазоне технологических параметров происходит уменьшение количества энергии лазерного излучения, необходимой для сквозного травления фольги, а также уменьшение площади микрократерной зоны, образовавшейся за время, необходимое для сквозного травления. Проведено математическое моделирование температурного поля в окрестности лазерного пятна, в результате которого определены градиенты температуры в зоне термического воздействия при различных значениях частоты следования лазерных импульсов. Полученные закономерности в качественных аспектах согласуются с результатами эксперимента.

ЛИТЕРАТУРА

1. Анисимович В.Г., Хмыль А.А. Стимулирование гальванических процессов оптическим излучением // Обзорная информация. Сер. 47.13.13. Технология и оборудование радиодеталестроения. - Мн.: БелНИИНТИ, 1991.-28 с.
2. Серянов Ю.В., Рабкин Б.Б., Сурменко А.А. Обзор по стимулированию гальванических процессов лазерным излучением // Электрохимия. - 1988. - Т. 24, № 7. - С. 911 - 925.
3. Серянов Ю.В., Аравина Л.В. Лазерно-химические реакции для получения элементов ИЭТ // Обзоры по электронной технике. Сер. 7. Технология, организация производства и оборудование. - М.: ВНИИТЭИ, 1990. - Вып. 11. - 42 с.
4. Феггер К. Электрохимическая кинетика. - М.: Наука, 1963. - 630 с.
5. Сангвал К. Травление кристаллов. Теория, эксперимент, применение. - М.: Наука, 1990. - 492 с.
6. Альтудов Ю.К., Гарицын А.Г. Лазерные микротехнологии и их применения в электронике. - М.: Наука, 2001.-632 с.