

ВЛИЯНИЕ РЕЖИМОВ ИОННОЙ ОБРАБОТКИ НА ШЕРОХОВАТОСТЬ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ ПОВЕРХНОСТЕЙ

INFLUENCE OF ION TREATMENT MODES ON METAL SURFACES ROUGHNESS

С.И.Егорова, / egorovasvetlana_1290@mail.ru, А.Д.Купцов, / alex-kouptsov@ya.ru
С.В.Сидорова, / sidorova_bmstu@mail.ru

S.I.Egorova, A.D.Kuptsov, S.V.Sidorova,

МГТУ им. Н.Э.Баумана, г.Москва

Рассмотрена актуальность применения ионного травления при создании компонентов микро- и нанoeлектроники. Описаны методы исследования влияния технологических параметров ионного травления на шероховатость и угол смачивания металлических образцов. Изучено влияние времени ионной обработки, угла падения ионного луча и потока рабочего газа на качество получаемой поверхности. Определен режим обработки, подходящий для достижения минимального значения параметра шероховатости металлических образцов.

Ключевые слова: Ионное травление, ионный источник, шероховатость, угол смачивание, модификация поверхности.

The relevance of the use of ion etching in the creation of micro- and nanoelectronics components is considered. Methods for studying the effect of ion etching parameters on the roughness and contact angle of metal samples are described. The influence of the ion treatment time, the angle of incidence of the ion beam, and the flow of the working gas on the quality of the resulting surface was studied. The processing mode suitable for achieving the minimum value of the roughness parameter of metal samples is determined.

Key words: Ion etching, ion source, roughness, contact angle, surface modification.

ВВЕДЕНИЕ

С развитием технологий появилась необходимость уменьшения шероховатости металлических поверхностей и деталей, применяемых в различных сферах машиностроения. Уменьшение шероховатости необходимо при изготовлении высокопрочного режущего инструмента перед нанесением тонкопленочного покрытия нитрида титана. Наилучшие результаты повышения эксплуатационной стойкости достигаются, если минимальная шероховатость поверхности не хуже $Ra = 0,08$ мкм [1]. Такое значение параметра шероховатости возможно получить с помощью ионного травления. Использование данного метода и нанесение покрытия в едином вакуумном цикле позволяет избежать загрязнения поверхности при переносе заготовок с одной рабочей зоны в другую. Также при ионном травлении увеличивается адгезия покрытий к подложке за счет активации поверхности и нагрева поверхности [2-3] и снимаются внутренние напряжения в поверхностном слое обрабатываемых образцов [4].

Уменьшение шероховатости металлических поверхностей также необходимо при создании компонентов микро- и нанoeлектроники. Так как размеры элементов и толщина диэлектрического слоя достаточно малы, необходимо обеспечить низкую шероховатость металлической подложки для уменьшения вероятности диэлектрического пробоя. Высота пиков поверхности должна быть минимальной, для обеспечения высокой равномерности наносимого изолирующего покрытия [5].

МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Процесс ионной обработки проводился в вакуумной технологической установке МВТУ-11-МС. Данная установка предназначена для очистки и проведения нескольких операций нанесения в едином вакуумном цикле. Данная технологическая установка предназначена для подключения источника ионов (ИИ), модулей термического и электронно-лучевого испарения и магнетрона. Радиальное расположение источника ионов и магнетрона и автоматизация вращения подложкодержателя позволяют перемещать образец от одного технологического источника к другому. Предельное давление, достигаемое в камере установки, составляет 0,005 Па. Такое давление достигается с помощью двухступенчатой системы откачки: предварительная откачка до давления 2,0 Па форвакуумным насосом XDS-10 в течение 15 - 20 минут; далее высоковакуумная откачка до остаточного давления турбомолекулярным насосом nEXT-240D. Время откачки составляет 28 минут, получаемый вакуум – безмасляный. Контроль давления осуществляется с помощью датчика Пирани и широкодиапазонного датчика WRG.

Измерение параметра шероховатости проводилось с помощью атомно-силового микроскопа (АСМ) и профилометра. С помощью АСМ Solver Next исследовались геометрические параметры и шероховатость образцов в полуконтактном режиме с использованием кремниевого кантилевера NSG01 с радиусом вершины 6 нм. Регистрация величины изгиба кантилевера позволяет получить изображение поверхностного рельефа рассматриваемого объекта. Исследование параметра шероховатости также проводилось с помощью профилометра TR220. Данный прибор определяет параметр шероховатости поверхности с помощью острого пера,двигающегося по поверхности образца. Датчик воспринимает неровности поверхности пером, сигнал поступает на фазочувствительный выпрямитель, усиливается и преобразуется. Собранные данные подвергаются цифровой фильтрации, и микросхема цифровой обработки сигналов производит расчет параметров. Результаты измерения можно считать на жидкокристаллическом дисплее, распечатать или передать на персональный компьютер.

В качестве измерительного прибора для исследования угла смачивания применяется гониометр ЛК-1. Прибор позволяет получать изображение лежащей на подложке капли с помощью цифровой видеокамеры и экспортировать изображение в компьютер. Определение краевого угла смачивания определяется методом касательной и на основе описания формы контура капли уравнением Лапласа.

Процесс ионного травления проводился с помощью ИИ. Данный технологический источник необходим для получения направленного ускоренного потока (пучка) ионов в вакууме. ИИ генерирует и испускает пучок ионов в форме цилиндра со слабым расхождением к конической форме. Ионный пучок распространяется параллельно образующей цилиндрической поверхности, проходящей через выпуклую щель источника, поэтому при проведении экспериментов необходимо располагать исследуемые образцы так, чтобы центр образца находился над осевой линией ИИ. Принцип действия ИИ заключается в отборе ионов из разряда, возбуждаемого между анодом и катодными пластинами, и испускании их в направлении обрабатываемого изделия. Расстояние от ИИ до подложкодержателя составляет 280 мм (рис. 1.). Обработка проводится при давлении 0,2 Па, силе тока 30 мА, напряжении 2 кВ и потоке газа аргона 2 сссм.

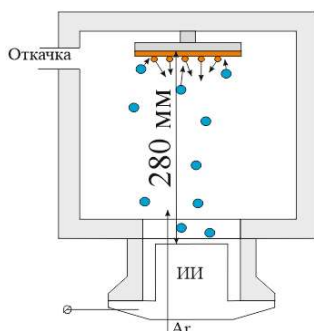


Рис.1. Схема процесса обработки.

Проводилось исследование по влиянию параметров ионного травления на шероховатость металлических образцов, предварительно очищенных в ультразвуковой ванне. В качестве исследуемых параметров выбрано время травления, поток рабочего газа аргона и угол падения ионного луча на поверхность подложки.

Длительность обработки влияет на глубину травления образцов. При длительной обработке происходит травление не приповерхностного слоя, а более глубоких слоев образца, где присутствуют различные дефекты поверхности и концентрации напряжений. При такой обработке шероховатость поверхности будет увеличиваться. При проведении эксперимента выбран диапазон варьирования временем ионного травления от 5 до 20 минут с шагом 5 минут.

В качестве рабочего газа был выбран инертный газ аргон. Поток рабочего газа влияет на интенсивность травления. При большом потоке ионы обладают большей энергией, а, следовательно, скорость ионного травления увеличивается. Экспериментальное исследование влияния потока рабочего газа аргона проводилось при значениях 2 и 4 сссм.

Другим немаловажным параметром при ионном травлении является угол падения ионного луча на поверхность исследуемых образцов. При различных углах падения реализуются разные механизмы травления (рис. 2.).

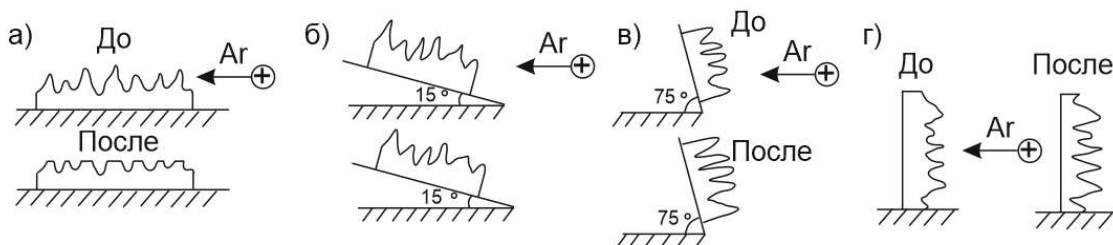


Рис. 2. Схемы ионной обработки: а – под углом 0 градусов; б – под углом 15 градусов; в – под углом 75 градусов; г – под углом 90 градусов.

При травлении под углом 0 градусов (рис. 2а.) пучок ионов распространяется параллельно образцу, вследствие чего большинство ионов не проникает вглубь материала. Происходит столкновение ионов с пиками поверхности и последующее их распыление, но число соударений достаточно мало, большинство ионов отражаются от поверхности, поэтому шероховатость поверхности уменьшается незначительно по сравнению с исходной.

Травление под углом 15 градусов (рис. 2б.) обусловлено преимущественно распылением пиков неровностей. Ионы инертного газа, проникая в поверхностный слой на небольшую глубину, вызывают каскад столкновений атомов материала, которые, обретя достаточную энергию, превышающую энергию связи атомов на поверхности, распыляются с поверхности, причем впадины распыляются медленнее, чем выступы, за счет того, что происходит их затенение. Также можно предположить, что отдельные

распыленные частицы с выступов заполняют впадины. Зависимость коэффициента распыления от угла пирамиды неровности при травлении под таким углом принимает почти линейный вид, что говорит о высокой равномерности травления выступов поверхности. Следовательно, при травлении под углом 15 градусов происходит значительное уменьшение шероховатости поверхности.

При травлении под углами 75 и 90 градусов (рис. 2в, г.) наблюдается преимущественно распыление впадин поверхности и как следствие увеличение шероховатости образца. Об этом говорит высокая неравномерность коэффициента распыления. Также можно предположить, что вектор импульса ускоренных ионов, попадающих в поверхностный слой образца, направлен вглубь материала. При этом происходит перераспределение энергии частиц внутри материала, а частицы на поверхности при каскадном соударении не получают достаточно энергии для того, чтобы разорвать энергию связи атомов. При таком травлении поверхность образцов будет становиться более развитой, а шероховатость значительно увеличиваться. Для исследования влияния угла падения ионов на шероховатость поверхности подложки устанавливались на подложкодержателе под углом от 15 до 90 градусов с шагом 15 градусов.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Исследование образцов, обработанных под углом 90 градусов, показало, что поверхность стала более развитой, значительно увеличились впадины микронеровностей, среднее значение параметра шероховатости увеличилось с 20,66 нм до 27,82 нм [6-7]. Такая обработка отрицательно влияет на уменьшение шероховатости, поэтому было принято решение о проведении ионного травления под другими углами.

Измерение шероховатости при обработке под углами от 15 до 75 градусов, времени бомбардировки поверхности от 5 до 20 минут и потоках 2 и 4 сссм (рис. 3.) показало, что при уменьшении угла падения ионов среднее значение шероховатости также уменьшается со 120 нм до 39 нм. При увеличении времени обработки шероховатость увеличивается до 107 - 366 нм.

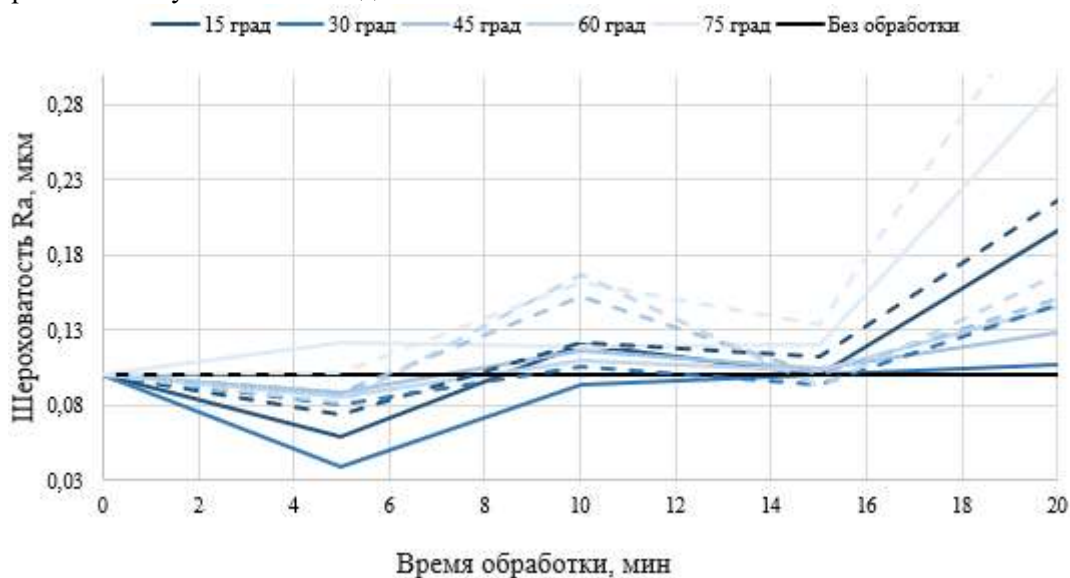


Рис.3. Зависимость параметра шероховатости от времени обработки и угла падения ионного луча при потоке 2 сссм (сплошная линия) и 4 сссм (пунктирная линия).

При обработке в течение 5 минут происходит уменьшение пиков и сглаживание поверхности, что приводит к уменьшению параметра шероховатости. При обработке в течение 10 минут происходит обработка более глубоких слоев поверхности и увеличение

впадин, поэтому шероховатость увеличивается. При дальнейшей обработке происходит травление более глубоких неполированных слоев, где присутствуют различные дефекты поверхности и дислокации. Поэтому при травлении таких слоев шероховатость увеличивается по сравнению с изначальной, но также сначала происходит травление пиков, сглаживание поверхности и травление впадин неровностей.

Исследование влияния параметров ионного травления показало, что шероховатость уменьшается при обработке под углами 15-45 градусов в течении 5-15 минут. Составленные уравнения регрессии (для всего диапазона варьирования параметрами: $Y=0,184+0,084X1+0,048X2$; для диапазона параметров, при котором наблюдается уменьшение шероховатости: $Y=0,115+0,052X1-0,022X2$, где Y – параметр шероховатости R_a , мкм; $X1$ – время обработки, мин; $X2$ – угол падения ионного луча, град) показывают, что поток рабочего газа не влияет на шероховатость поверхности при диапазоне варьирования от 2 до 4 сссм. Так же можно сделать вывод о том, что наименьшей шероховатости можно достичь при обработке под углом 30 градусов в течении 5 минут. Было принято решение об исследовании угла смачивания образцов, шероховатость которых уменьшилась после ионной обработки. Исследовались образцы, подвергающиеся травлению под углом 15-45 градусов в течении 5-15 минут (рис. 4.).

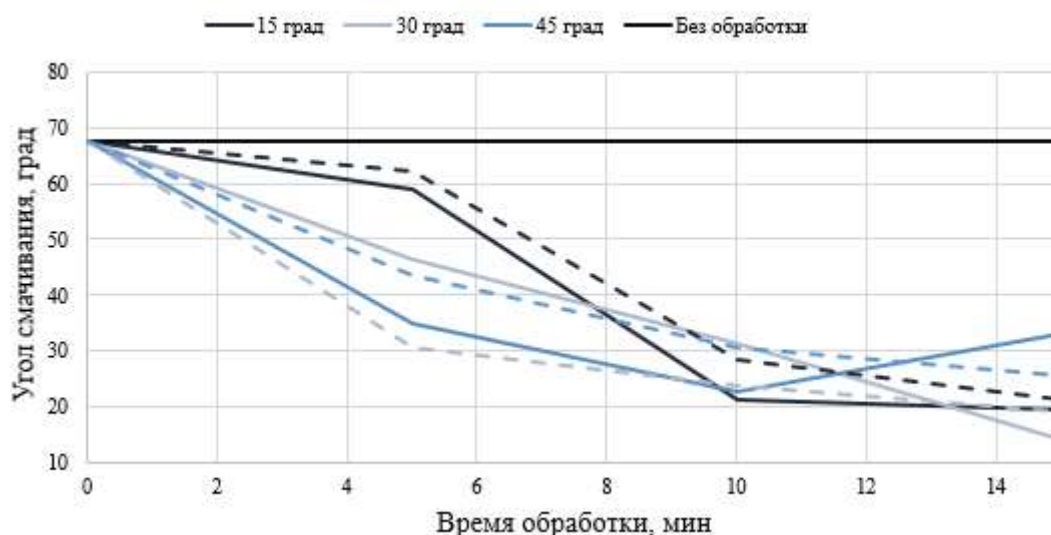


Рис. 4. Зависимость параметра угла смачивания от времени обработки и угла падения ионного луча при потоке 2 сссм (сплошная линия) и 4 сссм (пунктирная линия).

В результате обработки экспериментальных данных была получена зависимость, которая показала, что на всем выбранном диапазоне исследования угол смачивания обработанных образцов уменьшается до 14 - 59 градусов по сравнению с первоначальным значением необработанного образца (68 градусов). При уменьшении угла смачивания увеличивается адгезия образца, что благоприятно влияет на качество дальнейшего наносимого покрытия.

ВЫВОДЫ

- При корректном подборе параметров ионного травления возможно добиться уменьшения шероховатости и повышения равномерности поверхности, что положительно влияет на адгезионные свойства и долговечность наносимых тонкопленочных покрытий.
- Для уменьшения шероховатости рекомендуется проводить ионное травление под углом 30 градусов в течение 5 минут.

- Поток рабочего газа в диапазоне от 2 до 4 сссм не влияет на шероховатость поверхности стали, следовательно, руководствуясь экономическими соображениями, рекомендуется проводить ионную обработку при малом потоке рабочего газа.
- При травлении с вышеуказанными параметрами возможно значительно снизить шероховатость образцов стали 12Х18Н10Т со 100 до 39 нм.

Уменьшение шероховатости благоприятно влияет на уменьшение вероятности диэлектрического пробоя при создании устройств микро- и наноэлектроники. Так, при изготовлении тонкопленочного датчика температуры с помощью ионно-плазменной обработки возможно добиться минимального значения параметра шероховатости для увеличения равномерности по толщине последующей осаждаемой диэлектрической пленки за счет сглаживания поверхности.

ЛИТЕРАТУРА

1. Финишная обработка поверхностей при производстве деталей. Россия, ЛитРес, 2018.
2. Белоус В. А. и др. Радиационные технологии модификации поверхности. I. Ионная очистка и высокодозовая имплантация //Физическая инженерия поверхности. – 2003.
3. Sidorova S V, Kouptsov A D and Pronin M A, Problems and Solutions of Automation of Magnetron Sputtering Process in Vacuum // Lecture Notes in Electrical Engineering, 2020.
4. Каблов Е.Н., Мубояджян С.А. Ионно-плазменные защитные покрытия для лопаток ГТД. С. 531–609 (Каблов Е.Н. Литье лопаток газотурбинных двигателей (сплавы, технологии, покрытия). М.: «МИСИС», 2001.)
5. Егорова С.И., Купцов А.Д. Источник ионов: применение, тестирование, моделирование // Сб. трудов 13-й всероссийской конференции молодых ученых и специалистов (с международным участием) "Будущее машиностроения России". М.: МГТУ им. Н.Э.Баумана, 2020.
6. Егорова С.И., Купцов А.Д., Сидорова С.В. Влияние ионно-плазменной обработки на структуру и свойства поверхностей // 33-я международная инновационная конференция молодых ученых и студентов по проблемам машиноведения, 30 ноября-02 декабря, 2021, Москва, ИМАШ РАН.
7. Купцов А.Д., Егорова С.И., Сидорова С.В. Ионно-плазменная модификация поверхности // Всероссийская конференции молодых ученых и специалистов (с международным участием) «Будущее машиностроения России»: Сборник докладов. – М.: МГТУ, 2021