

ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ ПРЕДВАРИТЕЛЬНОЙ ОБРАБОТКИ НА ФОРМИРОВАНИЕ ТОНКОПЛЕНОЧНЫХ ПОКРЫТИЙ С МАЛЫМИ ЗНАЧЕНИЯМИ ОСТАТОЧНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ

А.Д. Купцов, С.В. Сидорова

АННОТАЦИЯ

В работе представлены результаты исследования влияния ионной обработки на адгезию пленки Al_2O_3 к подложке из ситалла и меди к многослойной структуре Al_2O_3 . Приведены результаты измерения профиля и шероховатости структур на профилометре. Показано, что ионная обработка ситалла в течение 2 минут протравливает поверхностный слой таким образом, что последующее нанесение покрытия Al_2O_3 толщиной до 50 нм не достигает изначального уровня подложки.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА

ИОННО-ПЛАЗМЕННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ, РАСПЫЛЕНИЕ, ОСТАТОЧНЫЕ НАПРЯЖЕНИЯ, СИТАЛЛ, ОКСИД АЛЮМИНИЯ, МЕДЬ, ШЕРОХОВАТОСТЬ

PRETREATMENT EFFECT EVALUATION ON THIN-FILM COATINGS FORMATION WITH LOW RESIDUAL STRESSES

A.D. Kouptsov, S.V. Sidorova

ABSTRACT

The paper presents the results of a study of the effect of ion treatment on the adhesion of an Al_2O_3 film to a citall substrate and copper to an Al_2O_3 multilayer structure. The results of measuring the profile and roughness of structures on the profilometer are presented. It is shown that the ion treatment of metal within 2 minutes etches the surface layer in such a way that the subsequent application of an Al_2O_3 coating with a thickness of up to 50 nm does not reach the initial level of the substrate.

KEYWORDS

ION-PLASMA TECHNOLOGIES, SPUTTERING, RESIDUAL STRESSES, SITALL, ALUMINUM OXIDE, COPPER, ROUGHNESS

ВВЕДЕНИЕ

Современные устройства, разрабатываемые на основе оптических и фотонных, а также электромагнитных явлений, обладают уникальными свойствами: сверхчувствительность, скорость считывания, плотность расположения элементов [1]. Для производства таких структурных единиц используют вакуумные технологии: травление и очистка в разряде плазмы, магнетронное осаждение. В результате формируются планарные электро-технические элементы, которые превосходят по характеристикам твердотельные массивные аналоги за счет размерного явления тонкопленочных покрытий толщиной менее 100 нм.

Важным параметром в формировании всего комплекса является подложка. Материал подложки, шероховатость поверхности, межплоскостное расстояние подложки, угол наклона кристаллических плоскостей – все это оказывает влияние на дальнейшее качество формирования тонкопленочных покрытий [2].

Многослойные кластеры позволяют обеспечить требования по надежности и функциональному назначению формируемых изделий. При этом последовательность пленок металл-диэлектрик-полупроводник толщиной от нанометров до микрометров подвержены влиянию остаточных напряжений, распределенных как в объеме структуры, так и на границах раздела пленок и подложки. Выделяют внешние и внутренние факторы возникновения напряжений, например, несоответствие кристаллической решетки подложки и пленки. Наличие напряжений не увеличивает трудозатраты технологического процесса, но релаксация напряжений может вызывать деструкцию покрытий, что приводит к ухудшению свойств и возможному отсутствию необходимых характеристик изделия.

Целью работы является исследование процесса ионно-плазменной подготовки подложки для формирования многослойных тонкопленочных покрытий с малыми значениями остаточных напряжений.

ОПИСАНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО И ИЗМЕРИТЕЛЬНОГО ОБОРУДОВАНИЯ

Технологический цикл создания многослойной структуры начинается с предварительной жидкостной очистки подложки в ультразвуковой ванне. Пьезоэлементы, обеспечивающие возбуждение ультразвуковой волны, работают на частоте 120 кГц. Также ванна оборудована возможностью нагрева раствора очистки, контроля и поддержания заданных параметров.

Вакуумная подготовка подложек и осаждение тонкопленочных структур происходит на кафедре «Электронные технологии в машиностроении» МГТУ им. Н.Э. Баумана, на лабораторной установке МВТУ-11-1МС на базе спирального форвакуумного и турбомолекулярного высоковакуумного насосов. В качестве технологических средств, обеспечивающих ионную обработку и очистку подложек используется столбчатый кольцевой источник ионов с диаметром ионного столба 23 мм. Нанесение диэлектрических и металлизированных слоев происходит магнетронной распылительной системой при ВЧ распылении мишени диаметром 50.8 мм.

Для контроля параметров межслоевой адгезии используется ручной адгезиметр методом решетчатых надрезов с последующим наклеиванием и отрывом клейкой маски от пленки. Результатом измерения служит качественная оценка того процента покрытия, которое осталось в области решетки.

Оценка профиля структуры и характерных значений происходит при помощи сертифицированного профилометра TR220. Профилометр оснащен прецизионным индукционным датчиком, что позволяет получать показания с точностью 10 % и воспроизводимостью результатов измерений 6 % в лаборатории для измерения параметров шероховатости подложек и тонкопленочных покрытий.

ФОРМИРОВАНИЕ МНОГОСЛОЕВОЙ СТРУКТУРЫ

Предварительное химическое обезжиривание происходит в аммиачном растворе $\text{H}_2\text{O}_2:\text{NH}_4\text{OH}:\text{H}_2\text{O}$ (2:1:10) при воздействии кавитации ультразвуковой ванны при

температуре 40 °С в течение 4 минут. Также для обезвоживания поверхности подложки происходит очистка в изопропиловом спирте особой чистоты в течение 2 минут.

Подложки загружаются в вакуумную камеру, откачиваемую до давления 0,01 Па. Затем три подложки обрабатываются высокоэнергетическим ионным пучком при ускоряющем напряжении 2040 В и токе разряда 30 мА, давлении вакуума 0,11 Па. Для оценки влияния ионной обработки подложки обрабатываются в течение 2 и 10 минут, одна подложка источником ионов не обрабатывается.

Далее методом магнетронного распыления при частоте напряжения 13,56 МГц и мощности тлеющего разряда 60 Вт на каждую подложку формируется покрытие из цельно-композитной мишени Al_2O_3 . Толщина пленки оксида оценивается по образцу-свидетелю и составляет 50 нм. Также методом магнетронного распыления формируется вторая пленка из меди при мощности разряда 75 Вт. Для последующей оценки адгезии изготавливаются два комплекта образцов по три подложки. Каждая серия формируется в едином вакуумном цикле: ионная обработка источником ионов, магнетронное распыление Al_2O_3 , измерение параметров (первая серия) и ионная обработка источником ионов, магнетронное распыление Al_2O_3 , магнетронное распыление Cu, измерение параметров (вторая серия). Внешний вид покрытий на подложке показан на рис. 1.

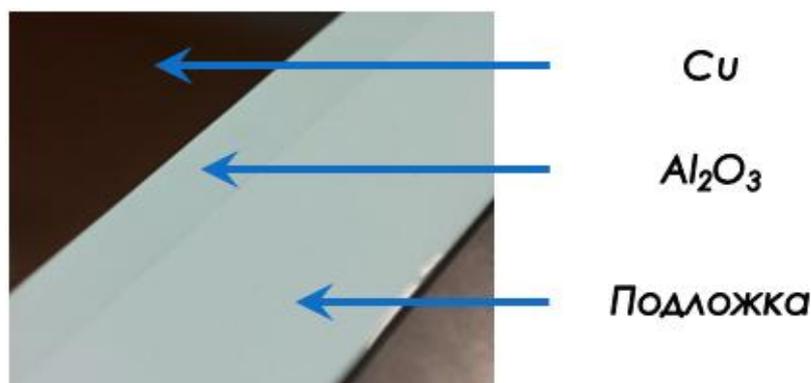
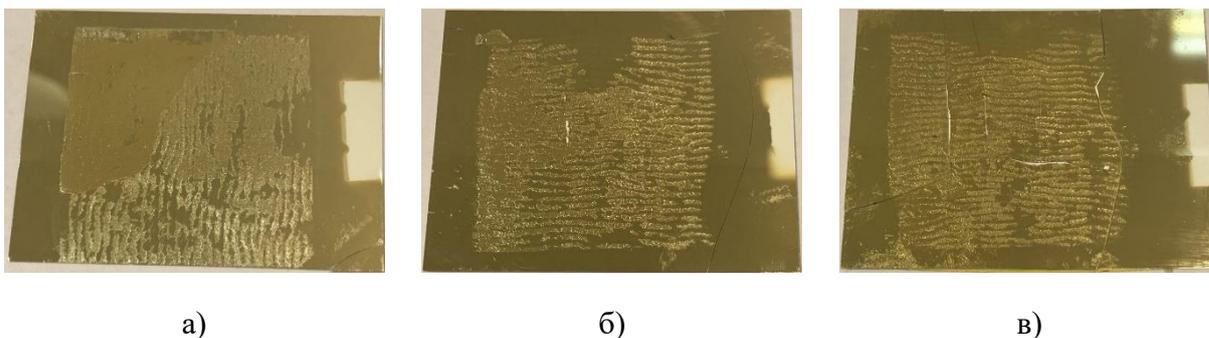


Рис. 1. Внешний вид многослойной структуры

Покрyтия формировались со смещением для последующего анализа и измерения профиля.

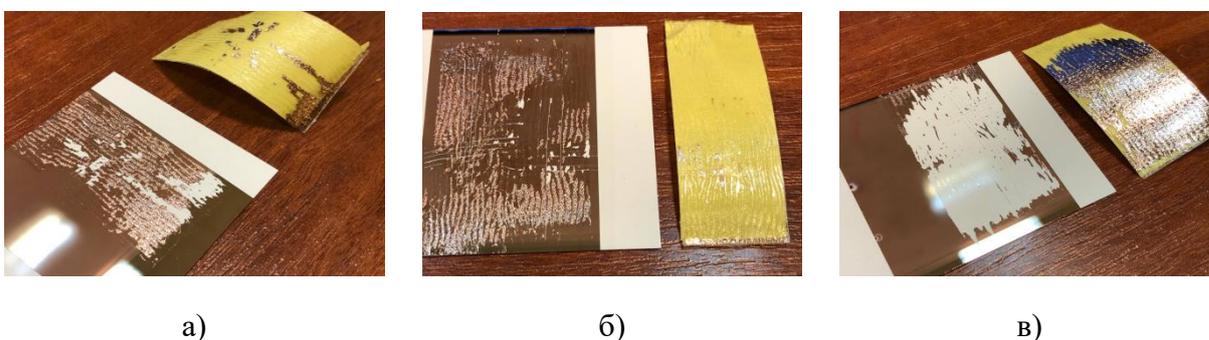
ИЗМЕРЕНИЕ АДГЕЗИИ

При исследовании влияния времени ионной обработки подложки на степень адгезии пленки к подложке оказалось, что вне зависимости от времени обработки вся структура пленки Al_2O_3 остается на подложке. На рис. 2 показаны подложки после измерения.



а – без обработки; б – время обработки 2 минуты; в – время обработки 10 минут
Рис. 2. Результат измерения адгезии пленки Al_2O_3 на ситалле

Аналогичное измерение проводится для второй партии подложек с пленкой меди. Результаты измерения показаны на рис. 3.



а – без обработки; б – время обработки 2 минуты; в – время обработки 10 минут
Рис. 3. Результат измерения адгезии пленки Cu на покрытии Al_2O_3

Результатом данного измерения является факт, что пленка Cu имеет худшую степень сцепления с Al_2O_3 , чем Al_2O_3 с подложкой. Однако, при времени обработки 2 минуты пленка Cu имеет лучший показатель по адгезии. На первом и третьем образце пленка Al_2O_3 не отслаивается от подложки. Результат измерения оказывается нетривиальным. Однако, как известно, ионная обработка позволяет увеличить и уменьшить шероховатость подложки в зависимости от режимов работы источника ионов [3, 4].

В настоящей работе пленка Al_2O_3 имеет малую толщину (менее 50 нм), следовательно, профиль поверхности пленки Al_2O_3 повторяет профиль и шероховатость подложки. При длительной ионной обработке подложки по нормали относительно угла падения ионного луча происходит увеличение шероховатости, следовательно, появляется большее количество дислокаций, которые нарушают целостность и межатомную энергию связи пленки Cu от чего ухудшается адгезия.

ИЗМЕРЕНИЕ ПРОФИЛЕЙ ПОВЕРХНОСТЕЙ

Последующее измерение профилей поверхностей показало, что до и после ионной обработки морфология поверхности подложки изменяется. Профилограмма образца, обработка которого проводилась в течение 2 минут, приведена на рис. 4, а результаты распределения кривой шероховатости показаны на рис. 5.

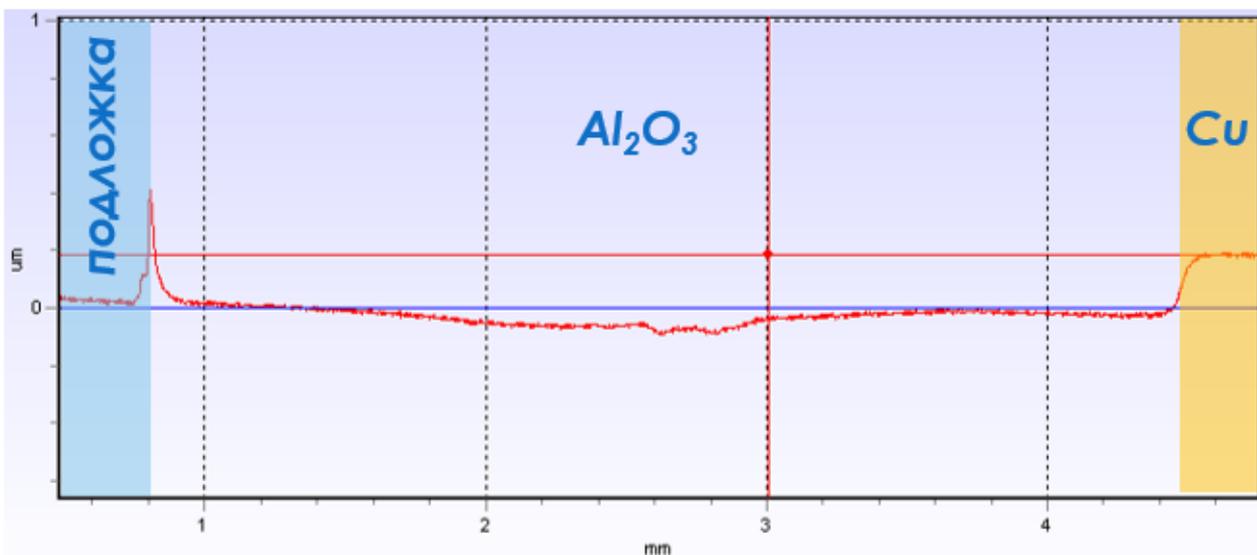


Рис. 4. Профиль поверхности многослойной структуры

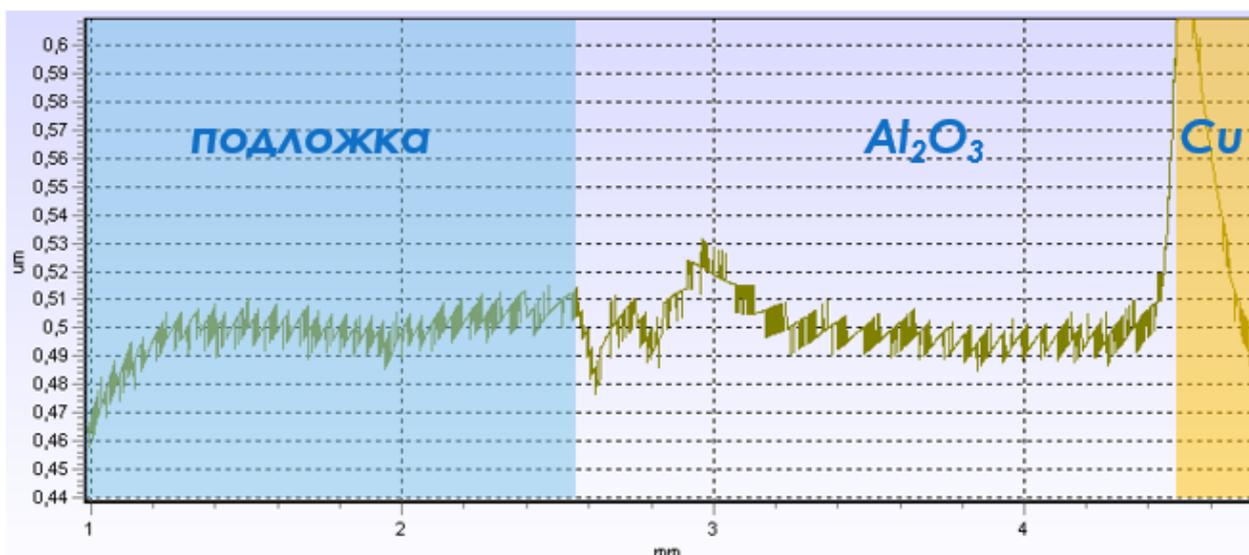


Рис. 5. Кривая шероховатости многослойной структуры

Измерение профиля структуры на профилемере показывает, что при обработке подложки источником ионов происходит вытравливание материала, поскольку даже с покрытием Al_2O_3 высота профиля пленки Al_2O_3 находится примерно на 2–5 нм ниже базовой поверхности подложки, которая была частично защищена маской от воздействия источником ионов.

Измерение кривой шероховатости показывает, что ионный пучок изменил профиль шероховатости в зоне обработки – профиль становится менее регулярным. Значения шероховатости подложки после ионной обработки изменяются с 35 нм до 45 нм.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Разработанная технология предварительной ионной обработки подложки в течение 120 секунд позволяет обеспечить необходимую степень адгезии диэлектрической пленки

оксида алюминия толщиной до 100 нм при последующем осаждении медной пленки толщиной 230 ± 15 нм.

Предварительная ионная обработка подложки в течение 120 секунд протравливает поверхностный слой таким образом, что последующее осаждение диэлектрической пленки оксида алюминия не превышает толщину «протравленного» слоя.

Предварительная ионная обработка ситалловой подложки более 120 секунд не является целесообразной, так как повышается волнистость поверхности подложки, что приводит к ухудшению адгезии последующих слоев.

Шероховатость пленки Al_2O_3 после обработки подложки источником ионов соответствует значению 45 нм. Базовая измеренная шероховатость подложки ситалла – 35 нм. Шероховатость увеличивается за счет травления впадин шероховатости при падении ионного пучка под углом 90 градусов относительно плоскости подложки.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе проведены исследования влияния предварительной ионной обработки подложки ситалла перед формированием слоя оксида алюминия и последующей металлизации. Показано, что параметры ионной обработки подложки перед формированием диэлектрического покрытия оказывают влияние на адгезию покрытия к подложке и адгезию последующего слоя металлизации.

В дальнейшей работе планируется провести исследование влияния режимов предварительной ионной обработки подложки на характер волнистости подложки.

ЛИТЕРАТУРА

1. Klimov V. I. (ed.). Semiconductor and metal nanocrystals: synthesis and electronic and optical properties. – CRC Press, 2003.
2. Бараз В.Р., Левченко В.П., Повзнер А.А. Строение и физические свойства кристаллов: учебное пособие / В.Р. Бараз, В.П. Левченко, А.А. Повзнер. Екатеринбург: УГТУУПИ, 2009. 164 с. ISBN 978-5-321-01262-8.
3. А. Д. Купцов, С. И. Егорова, А. А. Фельде [и др] Модификация поверхностей изделий нанотехнологии для уменьшения остаточных напряжений // Вакуумная наука и техника: Материалы XXIX научно-технической конференции с участием зарубежных специалистов, Крым, Судак, 16–21 сентября 2022 года. – Москва: Общество с ограниченной ответственностью "Электривакуумные технологии", 2022. – С. 253-262.
4. Егорова, С. И. Влияние ионно-плазменной обработки на структуру и свойства поверхностей / С. И. Егорова, А. Д. Купцов, С. В. Сидорова // XXXIII Международная инновационная конференция молодых ученых и студентов по проблемам машиноведения (МИКМУС - 2021) : Труды конференции, Москва, 30 ноября – 02 2021 года. – Москва: Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт машиноведения им. А.А. Благонравова Российской академии наук, 2021. – С. 534-540.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

Купцов Алексей Дмитриевич – аспирант 1 года (ORCID 0009-0002-3997-9722). МГТУ им. Н.Э. Баумана, г. Москва, e-mail: alex-kouptsov@yandex.ru

Сидорова Светлана Владимировна – кандидат технических наук, доцент кафедры (ORCID: 0000-0002-3002-1246). МГТУ им. Н.Э. Баумана, г. Москва, e-mail: sidorova_bmstu@mail.ru