

ПЛАЗМЕННАЯ ОБРАБОТКА В ВАКУУМЕ ОКСИДА АЛЮМИНИЯ

В.С. Мальцев, С.В. Сидорова

АННОТАЦИЯ

В работе представлены результаты исследования по обработке поверхностей Al_2O_3 в плазме при различном содержании компонентов газовой смеси. Выявлены зависимости шероховатости поверхности полученного магнетронным методом оксида алюминия от состава рабочего газа и времени обработки. Выделены особенности плазменной обработки оксида алюминия при использовании кислорода. Данная статья показывает влияние добавления кислорода в газовую смесь с аргоном на шероховатость поверхности оксида алюминия.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА

ПЛАЗМА, ВАКУУМ, ПЛАЗМЕННОЕ ТРАВЛЕНИЕ, ОКСИД АЛЮМИНИЯ, ПРОФИЛОМЕТР, АКТИВАЦИЯ ПО-ВЕРХНОСТИ, ШЕРОХОВАТОСТЬ ПОВЕРХНОСТИ

PLASMA TREATMENT OF ALUMINUM OXIDE IN VACUUM

V.S. Maltsev, S.V. Sidorova

ABSTRACT

In this work, studies were carried out on the processing of the content of Al_2O_3 in plasma at various contents of the components of the gas mixture. Dependences of the surface roughness of aluminum oxide obtained by the magnetron method on the composition of the working gas and the processing time are revealed. The features of aluminum oxide plasma treatment using oxygen are highlighted. This article shows the effect of adding oxygen to a gas mixture with argon on the surface roughness of aluminum oxide.

KEYWORDS

PLASMA, VACUUM, PLASMA ETCHING, ALUMINUM OXIDE, PROFILOMETER, SURFACE ACTIVATION, SURFACE ROUGHNESS

ВВЕДЕНИЕ

Известно, что состояние поверхности подложки оказывает существенное влияние на структуру наносимых пленок и параметры пленочных элементов [1]. При проектировании устройств микроэлектроники к структурным слоям применяются повышенные требования по качеству и структуре поверхности для обеспечения требуемых свойств при нанесении последующих слоёв.

При нанесении тонких пленок толщиной до 100 нм допустимая высота микронеровностей не должна превышать 25 нм. Однако, в случае формирования элементов микросхем в десятки нанометров, требования к шероховатости пропорционально изменяются вплоть до единиц нанометров.

Во многих изделиях микроэлектроники в качестве диэлектрического слоя используется оксид алюминия. Например, в качестве диэлектрического слоя многих СВЧ устройств [2]. Таким образом, появляется необходимость в управлении шероховатостью поверхности функциональных слоёв изделия. Одним из возможных методов модификации поверхности является плазменная обработка [3]. Данный процесс характеризуется снятием слоя

материала с поверхности с использованием плазменных процессов. В качестве технологического газа используется инертный газ или смесь газов, зачастую используется аргон. А шероховатость подложки зависит от материала и метода обработки.

Таким образом, целью данной работы является исследование влияния процесса плазменной обработки на поверхность слоя оксида алюминия.

ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЕ И ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОЕ ОБОРУДОВАНИЕ

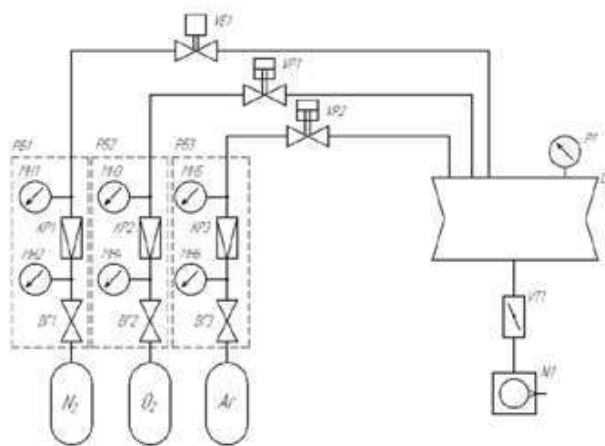
Плазменная обработка заключается в выбивании атомов или молекул с поверхности материала подложки под действием кинетической энергии электронов, ускоренных в электрическом поле.

Плазменную обработку материалов проводили на установке TRION SIRUS T2 на базе МГТУ им. Н. Э. Баумана, которая предназначена для очистки и травления в вакууме [4]. Trion – установка плазмохимического травления (RIE; RIE+ICP) для лабораторий. Установка может использоваться для любых процессов плазмохимического травления с использованием как инертных, так и фторных газов, кислорода. Опционально доступен ICP (индуктивно-связанная плазма) реактор. Установка позволяет производить травление в среде из 3 газов, которые можно использовать по отдельности или в смеси с контролируемой концентрацией.

Данная установка позволяет контролировать такие параметры как: давление (1...10000 мТорр), мощность (10...500 Вт), концентрация газа (0...250 сссм) и время процесса.



а)



б)

Рис.1. Общий вид установки TRION SIRUS T2 (а) и её принципиальная схема (б)

В качестве образцов были использованы кремниевые подложки с тонкопленочным покрытием оксида алюминия, полученного методом магнетронного распыления. Образцы подвергали воздействию плазмы смеси газов Ar/O₂ со следующими параметрами процесса: давление – 100 мТорр; мощность – 150 Вт; суммарный поток газа – 200 сссм. Процентное содержание O₂ в газовой смеси изменялось с 0% до 10%, время варьировали от 5 до 40 минут.

Контроль шероховатости образцов до и после плазменной обработки производили на профилометре TR200.

ПРОВЕДЕНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

Предварительные эксперименты проводили на кремниевых подложках с нанесенным оксидом алюминия. В результате обработки в плазме подложек оксида алюминия была получена серия образцов. Экспериментальные образцы были исследованы на профилометре, оценена шероховатость образцов до и после обработки.

В таблице 1 представлены значения измерения шероховатости в пяти точках и приведено среднее значение изменения шероховатости до (№1) и после (№2–5) плазменной обработки при разном составе газовой смеси ($Ar+O_2$). Так как диапазон измерения шероховатости R_a на профилометре TR200 для базовой длины составляет от 0,005 до 16 мкм, то полученные значения в 1–3 нм можно считать минимально возможными для измерения и оценить изменение шероховатости от начального значения 7 нм.

Таблица 1
 Результаты обработки оксида алюминия в плазме

№	Режим	Точка 1	Точка 2	Точка 3	Точка 4	Точка 5	Среднее значение шероховатости
1	t = 0 мин	0,007	0,008	0,005	0,009	0,006	0,007
2	10% O ₂ ; t = 5 мин	~0,001	~0,003	~0,002	~0,003	-	0,002
3	10% O ₂ ; t = 10 мин	~0,001	~0,001	~0,002	~0,003	-	0,002
4	10% O ₂ ; t = 20 мин	~0,001	~0,001	~0,002	~0,001	-	0,001
5	0% O ₂ ; t = 40 мин	0,005	0,015	0,008	0,015	0,008	0,010

Следует отметить, что при обработке оксида алюминия в плазме аргона (Рис. 2) в течение 40 минут, наблюдается увеличение шероховатости. Как выяснилось, ионы аргона позволяют активировать поверхность оксида, образуя центры притяжения заряженных частиц плазмы, а кислород позволяет повысить эффективность образования новых функциональных групп. В связи с этим было принято решение обрабатывать образцы в плазме аргона с добавлением кислорода.

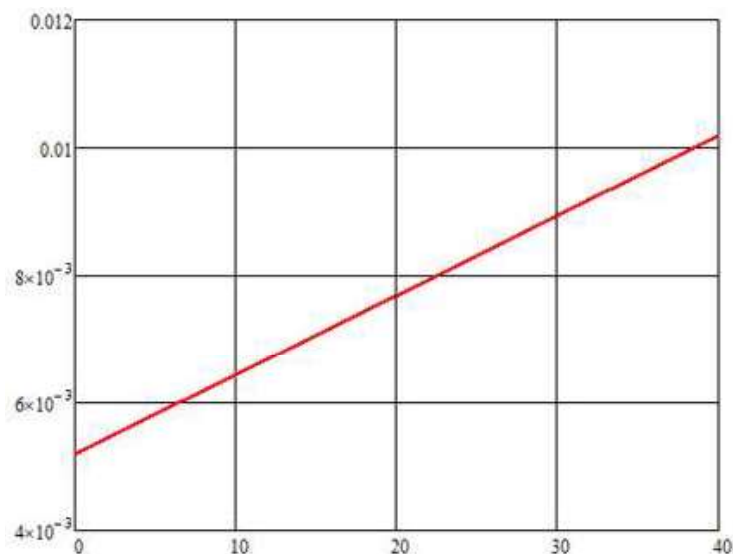


Рис. 2. Зависимость шероховатости поверхности оксида алюминия от времени обработки в плазме Ar

Обработка в плазме аргона с добавлением кислорода (рис. 3) показала уменьшение шероховатости поверхности оксида алюминия до единиц нанометров с погрешностью измерения прибора $\pm 10\%$ (профилометр TR200).

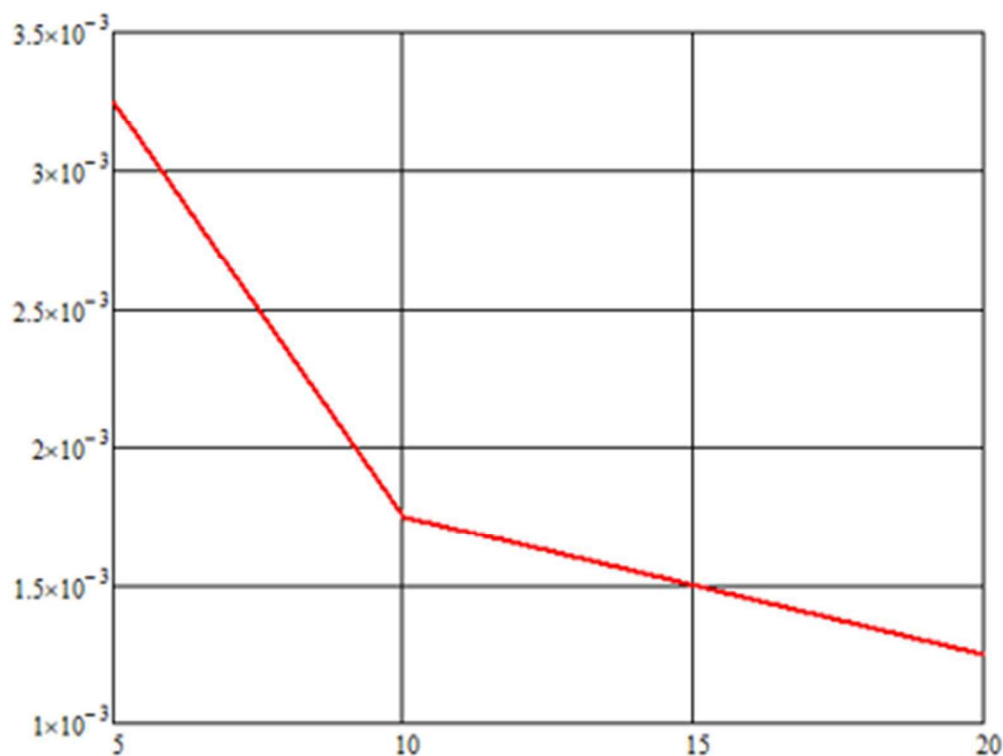


Рис. 3. Зависимость шероховатости поверхности оксида алюминия от времени обработки в плазме с 10% кислорода

По полученным результатам были построены регрессионные модели, описывающие зависимость шероховатости оксида алюминия от времени:

- при обработке в плазме аргона в течение 40 минут (1):

$$Ra = 5,2 + 0,125t; \quad (1)$$

- при обработке в плазме смеси газов аргона и кислорода с 10% кислорода в течение 20 минут (2):

$$Ra = 3,25 - 0,0377t, \quad (2)$$

где Ra – шероховатость поверхности, нм; t – время, с.

В связи с резким снижением шероховатости уже через 5 минут после начала обработки было принято решение подробнее рассмотреть этот временной интервал.

По результатам экспериментов была построена регрессионная модель, описывающая зависимость шероховатости поверхности Al_2O_3 от времени обработки в плазме аргона с 10% кислорода для первых 5 минут обработки (3) и построен график, показывающий результаты экспериментов (рис. 4).

$$Ra = 4,16 - 0,566t \quad (3)$$

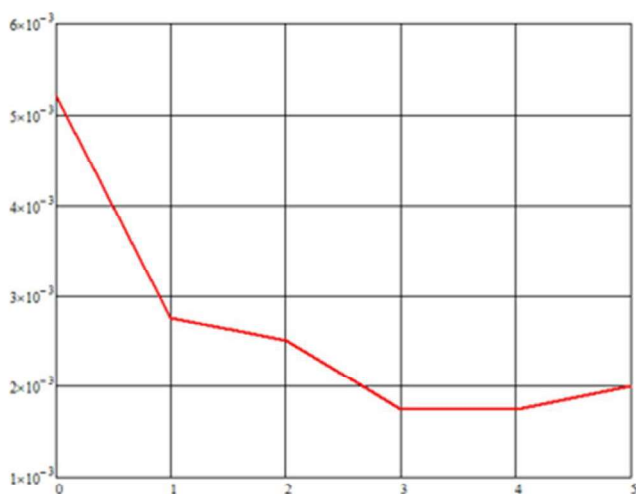


Рис. 4. Зависимость шероховатости поверхности оксида алюминия от времени обработки в плазме аргона с 10% кислорода для первых 5 минут обработки

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ И ВЫВОДЫ

При обработке оксида алюминия в плазме аргона шероховатость поверхности увеличивается с увеличением времени обработки. Выявлено, что при добавлении в смесь газов кислорода, а результат получается противоположный: шероховатость уменьшается. Анализ полученных уравнений регрессии показывает, что увеличение процентного содержания кислорода в системе не является значимым фактором. Возможно применение газовой среды (90+10) % (Ar+O₂) для более точного контроля над шероховатостью поверхностей оксида алюминия при создании изделий микроэлектроники.

Для уменьшения шероховатости поверхности оксида алюминия следует обрабатывать образцы в плазме Ar+O₂ в течение 10 минут. В этом случае шероховатость поверхности достигает значений в единицы нанометров. Следует отметить, что процентное содержание кислорода в смеси не оказывает существенного влияния на шероховатость, поэтому достаточно добавления 10% кислорода.

Для увеличения шероховатости поверхности оксида алюминия необходимо обрабатывать образцы в плазме аргона без добавления кислорода.

По результатам экспериментов построены уравнения регрессии, которые показывают значимость лишь временного фактора.

При обработке оксида алюминия в плазме аргона наблюдается увеличение шероховатости от 7 нм до 11 нм.

ЛИТЕРАТУРА

1. Технология тонких пленок и покрытий: учеб. пособие / Л. Н. Маскаева, Е. А. Федорова, В. Ф. Марков. М-во науки и высш. образования Рос. Федерации, Урал. федер. ун-т. – Екатеринбург: Изд-во Урал. ун-та, 2019. 236 с.
2. Петров В. М., Шамрай А. В. СВЧ интегрально-оптические модуляторы. Теория и практика: учебное пособие. - Санкт-Петербург: Университет ИТМО, 2021. - 225 с
3. Ветошкин В. М. Экспериментальная установка для исследования вакуумно-плазменных процессов обработки кварца: автореф... дис. кан. тех. наук. – Ижевск: 2009. – 138 с.

4. Севрюгина Е. А., Семочкин А. И., Мальцев В. С. Исследование влияния плазменной и ионно-лучевой обработки на эпоксидную смолу //Вакуумная, компрессорная техника и пневмоагрегаты-2021. – 2021. – С. 83-89.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

В.С. Мальцев – студент 1 курса магистратуры кафедры «Электронные технологии в машиностроении» МГТУ им. Н.Э. Баумана, г. Москва; e-mail: malzev.vladislav.99@gmail.com

С.В. Сидорова – кандидат технических наук, доцент кафедры «Электронные технологии в машиностроении» МГТУ им. Н.Э. Баумана, г. Москва; e-mail: sidorova@bmstu.ru