

УДК 621.3.049.77: 621.793

DOI: https://doi.org/10.54341/20778708_2022_3_52_97
EDN: HSP0IT

ОСОБЕННОСТИ РЕАКТИВНОГО МАГНЕТРОННОГО НАНЕСЕНИЯ ПЛЕНОК ОКСИДА ТАНТАЛА ПРИ РАЗЛИЧНЫХ СПОСОБАХ ПОДАЧИ ГАЗА В КАМЕРУ

Х.Т. Доан¹, Д.А. Голосов¹, В.А. Бурдовицин², С.М. Завадский¹, С.Н. Мельников¹

¹Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, Минск

²Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники, Томск

PECULIARITY OF REACTIVE MAGNETRON DEPOSITION OF TANTALUM OXIDE FILMS WITH DIFFERENT METHODS OF GAS SUPPLY INTO THE CHAMBER

H.T. Doan¹, D.A. Golosov¹, V.A. Burdovitsin², S.M. Zavadski¹, S.N. Melnikov¹

¹Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics, Minsk

²Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics, Tomsk

Аннотация. Проведены исследования процессов реактивного магнетронного распыления Ta мишени в Ar / O₂ смеси газов. Установлены зависимости напряжения разряда, скорости нанесения и электрофизических характеристик пленок оксида тантала от способа газоподачи и концентрации кислорода в Ar / O₂ смеси газов. Установлено, что металлический, переходной и реактивный режим работы системы распыления определяются изменением скорости нанесения пленок. Независимо от способа подачи рабочих газов в камеру, начальное формирование диэлектрических пленок оксида тантала с низким оптическим поглощением наблюдается в переходном режиме работы системы.

Ключевые слова: тонкие пленки, оксид тантала, реактивное магнетронное распыление, скорость нанесения, диэлектрические свойства.

Для цитирования: Особенности реактивного магнетронного нанесения пленок оксида тантала при различных способах подачи газа в камеру / Х.Т. Доан, Д.А. Голосов, В.А. Бурдовицин, С.М. Завадский, С.Н. Мельников // Проблемы физики, математики и техники. – 2022. – № 3 (52). – С. 97–104. – DOI: https://doi.org/10.54341/20778708_2022_3_52_97. – EDN: HSP0IT

Abstract. The processes of reactive magnetron sputtering of a Ta target in an Ar / O₂ gas mixture have been studied. The dependences of the discharge voltage, deposition rate, electrical and physical characteristics of tantalum oxide films on the method of gases supply and oxygen concentration in the Ar / O₂ gas mixture are established. It has been established that the metallic, transition and reactive modes of the sputtering system operation are determined by the change in the rate of film deposition. Regardless of the method of the working gases supply, the initial formation of dielectric tantalum oxide films with low optical absorption is observed in the transition mode of the system operation.

Keywords: thin films, tantalum oxide, reactive magnetron sputtering, deposition rate, dielectric properties.

For citation: Peculiarity of reactive magnetron deposition of tantalum oxide films with different methods of gas supply into the chamber / H.T. Doan, D.A. Golosov, V.A. Burdovitsin, S.M. Zavadski, S.N. Melnikov // Problems of Physics, Mathematics and Technics. – 2022. – № 3 (52). – P. 97–104. – DOI: https://doi.org/10.54341/20778708_2022_3_52_97 (in Russian). – EDN: HSP0IT

Введение

В последние годы большое внимание уделяется исследованию пленок оксидов переходных металлов с целью поиска перспективных материалов для приборов оптики, электроники и микроэлектроники [1]. Среди оксидов переходных металлов особый интерес вызывает оксид тантала (Ta₂O₅) [2]–[4]. Оксид тантала имеет высокий показатель преломления ($n = 2,1–2,4$) и слабое поглощение в видимом диапазоне ($k < 0,005$) [5]. Поэтому тонкие пленки оксида тантала широко применяются в оптике в качестве слоев интерференционных фильтров [6], антиотражающих покрытий солнечных батарей [7],

оптических волноводов [8]. Пленки Ta₂O₅ также обладают сравнительно высокой диэлектрической проницаемостью ($\epsilon \approx 25$), низким током утечки и высокой электрической прочностью. Край фундаментального поглощения оксида тантала близок к 280 нм, а ширина запрещенной зоны составляет $E_g = 4,1–4,5$ эВ. Кроме того, Ta₂O₅ характеризуется высокой химической стойкостью и термической стабильностью свойств. Поэтому тонкие пленки оксида тантала перспективны для применения в качестве диэлектрика в приборах микроэлектроники для замены традиционного диоксида кремния [9],

[10]. Пленки Ta_2O_5 , наряду с HfO_2 , ZrO_2 и TiO_2 , рассматриваются в качестве слоев подзатворного диэлектрика современных структур металл – оксид – полупроводник (МОП) и диэлектрического слоя накопительных конденсаторов элементов памяти динамического типа [11], функциональных слоев твердотельных датчиков [12] и тонкопленочных катализаторов [13].

Для получения пленок оксида тантала применяется ряд методов осаждения, однако наибольшую перспективу имеет метод реактивного магнетронного распыления [14]. Метод обеспечивает высокие скорости нанесения пленок оксидов и нитридов, их высокую химическую чистоту, плотность и адгезию к подложке. Хотя концептуально реактивное распыление просто, фактически это сложный и нелинейный процесс [15]. При реактивном магнетронном нанесении пленок оксидов металлическая мишень распыляется в среде Ar с добавлением реактивного газа (O_2). Образование окисной пленки происходит не только на подложке, но и на поверхности мишени и стенках камеры. Образующиеся окисные слои влияют на разряд магнетрона и, как следствие, на состояние системы распыления. В результате при тех же параметрах процесса скорость нанесения может изменяться на порядок, а состав пленок значительно различаться, т. е. возникает гистерезис характеристик. Наличие такой взаимосвязи параметров существенно усложняет управление процессом [16]. Поэтому чаще всего нанесение пленок производится в «оксидном» состоянии мишени (больших концентрациях кислорода) при фиксированном расходе O_2 относительно расхода Ar . При этом смесь газов (Ar / O_2) подается в камеру или непосредственно в зону разряда. Работа в оксидном состоянии мишени позволяет избавиться от нестабильности процесса. Однако в данном режиме возможно формирование пленок только близких к высшему оксиду с низкими скоростями нанесения. Более выгодна работа в переходном режиме работы системы, где формируются диэлектрические пленки и скорость нанесения имеет сравнительно высокие значения. Однако неустойчивость процесса реактивного распыления в переходном режиме приводит к необходимости управления расходом кислорода в реальном времени с использованием специальных систем обратной связи, что усложняет процесс нанесения [17]. Значительно улучшить стабильность процесса в переходном режиме возможно путем уменьшения влияния кислорода на состояние мишени. Это достигается за счет уменьшения парциального давления кислорода в разрядной зоне магнетрона. Такой эффект может быть получен при использовании процессов высоковакуумного магнетронного распыления [18], [19] и/или пространственного разделения объемов за счет отдельной подачи газов. При отдельной

газоподаче распыление мишени проводится в среде Ar , который подается в область разряда магнетрона, а кислород подается в область подложки, где происходит конденсация распыленного потока и формирование пленки соединения. Однако практически отсутствуют статьи, в которых бы анализировались особенности формирования методом реактивного магнетронного распыления пленок оксидов при отдельной газоподаче. Таким образом, целью работы являлось исследование особенностей процессов формирования пленок оксида тантала при различных способах газоподачи для определения методов воспроизводимого нанесения диэлектрических пленок в переходном режиме работы системы распыления.

1 Эксперимент

Схема экспериментальной установки для нанесения слоев оксида тантала методом реактивного магнетронного распыления приведена на рисунке 1.1. Установка выполнена на базе вакуумного поста ВУ-1. Камера установки была оборудована высоковакуумной магнетронной распылительной системой (MPC) MAPC.011-80 с мишенью $\varnothing 80$ мм и ионным источником на основе торцевого холлового ускорителя. Подложкодержатель располагался на расстоянии 120 мм от поверхности мишени. По контуру подложкодержателя располагался кольцевой газораспределитель. В ходе экспериментов использовались два способа подачи рабочих газов в камеру:

1) смесь газов (Ar / O_2) подавалась в газораспределительную систему магнетрона (совместная газоподача или СГ);

2) инертный газ (Ar) подавался в газораспределительную систему магнетрона, а реактивный газ (O_2) подавался в газораспределитель в области подложки (раздельная газоподача или РГ).

Для поддержания заданных расходов газов использовались автоматические регуляторы расхода газа РРГ-1.

Пленки оксида тантала наносились на пластины из высоколегированного монокристаллического кремния ЭКЭС 0.01 (100) $\varnothing 200$ мм и на подложки из оптического кварца. В ходе экспериментов подложки устанавливались на подложкодержатель. Камера вакуумной установки откачивалась до остаточного давления 10^{-3} Па и производилась ионная очистка подложек. Для этого подложка подводилась в зону очистки и в ионный источник подавался Ar . Поток аргона составлял $Q_{Ar} = 30$ мл/мин. Время очистки, напряжение и ток разряда во всех экспериментах были постоянными и составляли 6 мин, 80 В, 7.0 А соответственно. Затем подложка подводилась в зону нанесения и производилось нанесение пленок. Распыление Ta мишени (чистота 99,9%) $\varnothing 80$ мм и толщиной 6 мм осуществлялось в среде Ar / O_2 газов. Содержание кислорода в камере

(Γ_{O_2}) изменялось от 0 до 90% при общем расходе 60 мл/мин. При этом давление в камере составляло 0,08 Па. Для питания магнетрона использовался униполярный импульсный ток (частота следования импульсов $F = 10$ кГц, коэффициент заполнения $D = 80\%$). Пленки наносились на вращающуюся подложку. Ось вращения подложки находилась на расстоянии 100 мм от оси магнетрона. Скорость вращения подложкодержателя 24,5 об/мин. Ток разряда магнетрона во всех экспериментах поддерживался постоянным и составлял $I_t = 1,5$ А. При этом напряжение разряда (U_t), в зависимости от концентрации кислорода и способа газоподачи, изменялось от 300 до 520 В. Толщина нанесенных пленок составляла около 100 нм и регулировалась временем нанесения. При исследовании профилей распределения скорости нанесения пленок подложка располагалась стационарно на оси магнетрона и расстоянии мишень – подложка 120 мм.

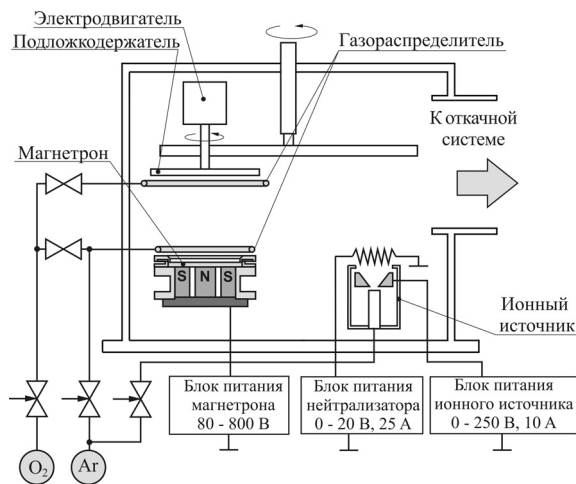


Рисунок 1.1 – Схема экспериментальной установки для нанесения пленок оксида тантала методом реактивного магнетронного распыления

Толщина нанесенных слоев определялась с помощью оптического интерферометрического профилометра ПОИ-08. Диэлектрические характеристики пленок оксида тантала измерялись на тестовых МОП структурах. Для этого на пленку оксида тантала методом ионно-лучевого распыления через маску наносился верхний Ni электрод. Площадь обкладки конденсатора составляла 0,096 мм². Емкость и тангенс угла диэлектрических потерь пленок измерены с использованием измерителя иммитанса Е7-20 на частотах 1,0 кГц и 1,0 МГц. Значения диэлектрической проницаемости рассчитывались исходя из толщины диэлектрического слоя и емкости конденсаторной структуры. Спектры пропускания в диапазоне 200–900 нм получены с помощью спектрофотометра Проскан МС-121.

2 Результаты и обсуждение

Проведены исследования влияния способа подачи газа в камеру на разрядные характеристики МРС. На рисунке 2.1 представлены зависимости напряжения разряда от концентрации кислорода в камере при распылении Та мишени в среде Ar / O₂ рабочих газов и различных способах газоподачи. Как видно из рисунка, независимо от способа подачи газа, зависимости имели сходный характер и на них можно было выделить три участка. На первом участке (низкие концентрации O₂) при увеличении содержания кислорода напряжение разряда практически линейно увеличивалось и достигало максимума. На втором участке (средние концентрации O₂) происходило некоторое снижение U_t и на третьем участке (большие концентрации O₂) напряжение разряда практически не зависело от Γ_{O_2} .

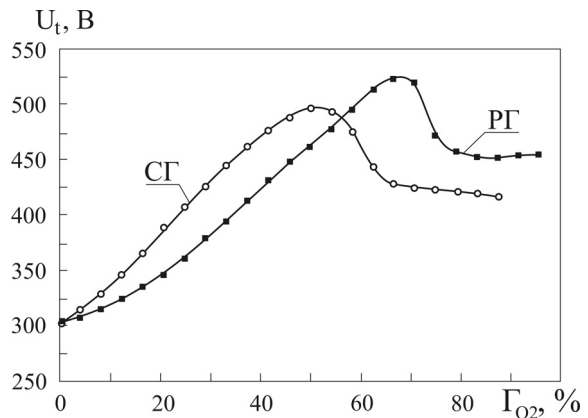


Рисунок 2.1 – Зависимости напряжения разряда от концентрации кислорода в камере при совместной (СГ) и раздельной (РГ) газоподаче

При совместной газоподаче (рисунок 2.1, кривая СГ) и увеличении потока O₂ напряжение разряда увеличивалось с 300 В до 490 В и достигало максимума при $\Gamma_{O_2} = 50\%$. При дальнейшем увеличении концентрации кислорода напряжение разряда снижалось до 430 В при Γ_{O_2} около 63% и далее не зависело от концентрации кислорода. При раздельной газоподаче (рисунок 2.1, кривая РГ) максимум напряжения разряда $U_t = 520$ В достигался при большей концентрации кислорода ($\Gamma_{O_2} = 68\%$). Переход на третий участок характеристики также наблюдался при большей концентрации кислорода (около 80%). При этом напряжение разряда имело большие, по сравнению с совместной газоподачей, значения $U_t = 450$ –452 В.

На рисунке 2.2 представлены зависимости скорости нанесения пленок оксида тантала (v) от концентрации кислорода в камере при совместной и раздельной газоподаче. При совместной газоподаче (рисунок 2.2, кривая СГ) и увеличении концентрации кислорода скорость нанесения практически линейно увеличивалась и достигала

максимума 0,86 нм/с при $\Gamma_{O_2} = 30\%$. При дальнейшем увеличении Γ_{O_2} скорость нанесения уменьшалась до 0,06 нм/с при $\Gamma_{O_2} = 60\%$ и далее практически не зависела от концентрации кислорода. При раздельной газоподаче (рисунок 2.2, кривая РГ) максимум скорости нанесения достигался при большей концентрации кислорода ($\Gamma_{O_2} = 50\%$). При дальнейшем увеличении Γ_{O_2} скорость нанесения также резко снижалась, однако в данном случае не наблюдалось пологого участка зависимости $v(\Gamma_{O_2})$.

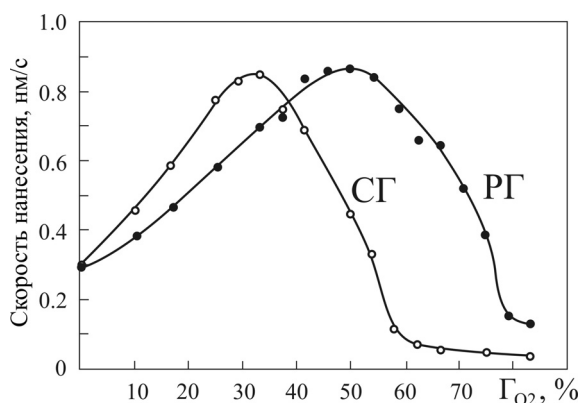


Рисунок 2.2 – Зависимость скорости нанесения пленок оксида тантала от концентрации кислорода в камере при совместной (СГ) и раздельной (РГ) газоподаче

Форма профилей распределения толщины пленок также зависела от способа газоподачи и концентрации кислорода в камере. На рисунках 2.3 и 2.4 представлены нормированные профили распределения скорости нанесения пленок оксида тантала, полученные при совместной и раздельной газоподаче. Профили распределения толщины пленок получены при стационарном размещении подложки на оси магнетрона на расстоянии 120 мм от поверхности мишени. При распылении Та мишени в среде Ar (рисунок 2.3, кривая а) профиль распределения толщины имел типичную для процессов магнетронного распыления форму, определяемую близким к косинусному угловому распределению распыленных частиц. На краях подложки $\varnothing 200$ мм скорость нанесения пленки составляла 0,37 от скорости нанесения на оси магнетрона. При совместной газоподаче и увеличении концентрации кислорода до 50% форма профиля не изменялась. Однако при Γ_{O_2} более 55% (кривая б) происходило изменение формы профиля и при Γ_{O_2} более 60% профиль распределения скорости нанесения пленок имел неоднородное распределение (кривая в). В центре зоны распыления формировался пик, где скорость нанесения значительно превышала скорость нанесения, характерную для магнетронного распыления. При дальнейшем увеличении Γ_{O_2} от 60% до 83,3% форма профиля не

изменялась. Аналогичные результаты были получены при раздельной газоподаче (рисунок 2.4). Однако в данном случае начальное изменение профиля происходило при Γ_{O_2} более 60% и явное формирование пика наблюдалось только при концентрации кислорода более 80%.

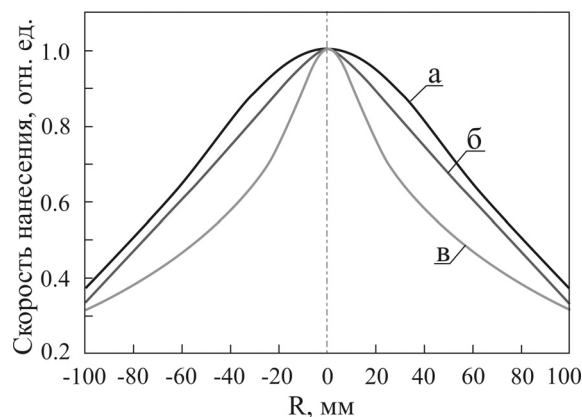


Рисунок 2.3 – Относительное распределение скорости нанесения пленок оксида тантала, нанесенных при различной концентрации кислорода в Ar / O₂ смеси газов:
а) 0 – 50,0%, б) 55,0%,
в) 61,7 – 91,7% (совместная газоподача)

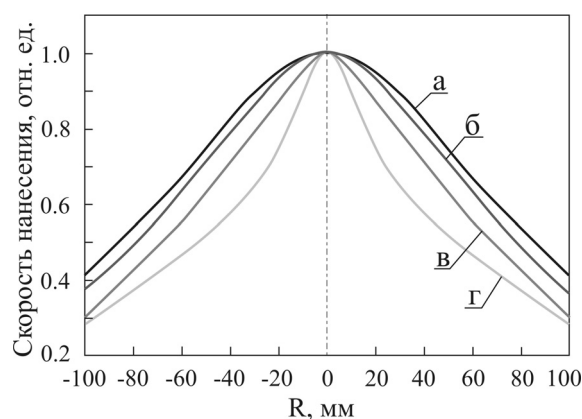


Рисунок 2.4 – Относительное распределение скорости нанесения пленок оксида тантала, нанесенных при различной концентрации кислорода в Ar / O₂ смеси газов:
(а) 0 – 50,0%, (б) 66,7%, (в) 75,0%,
(г) 83,33 – 91,7% (раздельная газоподача)

Как известно, для процессов реактивного магнетронного распыления характерны три режима работы системы: металлический, переходной и реактивный, различающиеся напряжением разряда, скоростью нанесения пленок и свойствами наносимых слоев [15]. Однако сопоставление рисунков 2.1–2.4 не позволяет нам однозначно выделить переход от металлического в переходной и далее в реактивный режим работы системы при совместной и раздельной газоподаче. Изменение поведения зависимостей $U_i(\Gamma_{O_2})$ и

$v(\Gamma_{O_2})$ и формы профилей скорости нанесения происходит при разных концентрациях кислорода. Однако при раздельной газоподаче отмечается смещение экстремумов характеристик в область более высоких концентраций кислорода.

Для определения взаимосвязи характеристик процесса реактивного распыления со свойствами формируемых слоев проведены исследования влияния способа подачи газов и концентрации кислорода в камере на диэлектрические и оптические характеристики пленок оксида тантала. На рисунках 2.5 и 2.6 представлены спектры оптического пропускания пленок, нанесенных при различных способах газоподачи и изменении Γ_{O_2} .

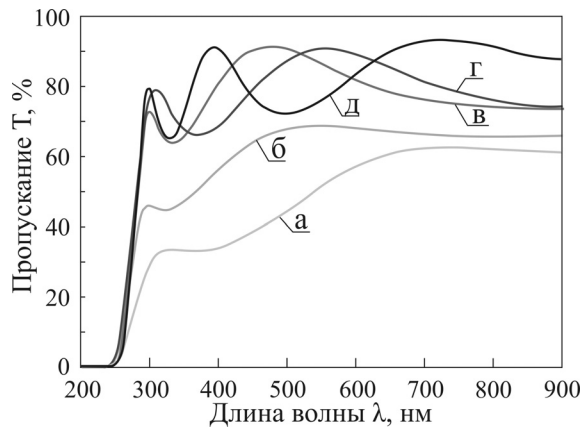


Рисунок 2.5 – Спектры оптического пропускания пленок оксида тантала, нанесенных при различной концентрации кислорода в камере: (а) 25%, (б) 29,2%, (в) 37,5%, (г) 41,7%, (д) 50% (совместная газоподача)

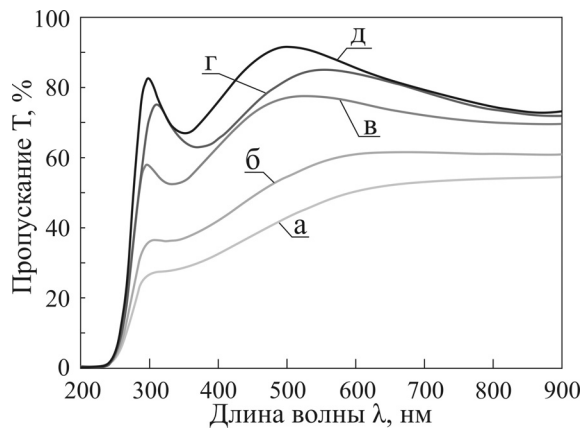


Рисунок 2.6 – Спектры оптического пропускания пленок оксида тантала, нанесенных при различной концентрации кислорода в камере: (а) – 37,5%, (б) – 41,7%, (в) – 45,8%, (г) – 50,0%, (д) – 54,2% (раздельная газоподача)

Как видно из рисунков, независимо от метода газоподачи для оптически прозрачных пленок, среднее оптическое пропускание в видимом диапазоне длин волн составляло около 80%.

Край оптического пропускания пленок находился на длине волны около 280 нм. Однако при разных методах газоподачи формирование оптически прозрачных пленок происходило при разных концентрациях кислорода. При совместной газоподаче (рисунок 2.5) переход от поглощающих пленок к оптически прозрачным наблюдался при концентрациях кислорода в камере 37,5%. При раздельной газоподаче переход происходил при больших концентрациях кислорода ($\Gamma_{O_2} = 54,2\%$) (рисунок 2.6).

Диэлектрические характеристики пленок также имели зависимость от способа газоподачи. При совместной газоподаче (рисунок 2.7) и концентрации кислорода менее 37,5% формировались электропроводящие пленки с высокими диэлектрическими потерями. При Γ_{O_2} более 37,5% формировались пленки с диэлектрической проницаемостью $\epsilon = 20 - 35$ и тангенсом угла диэлектрических потерь $\text{tg}\phi = 0,018 - 0,022$ на частоте 1 кГц. На высоких частотах (1 МГц) диэлектрическая проницаемость составляла $\epsilon = 18 - 22$, а тангенс угла диэлектрических потерь имел более высокие значения $\text{tg}\phi = 0,26 - 0,3$.

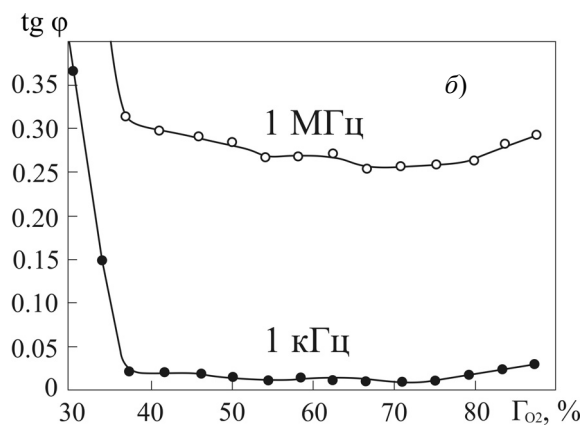
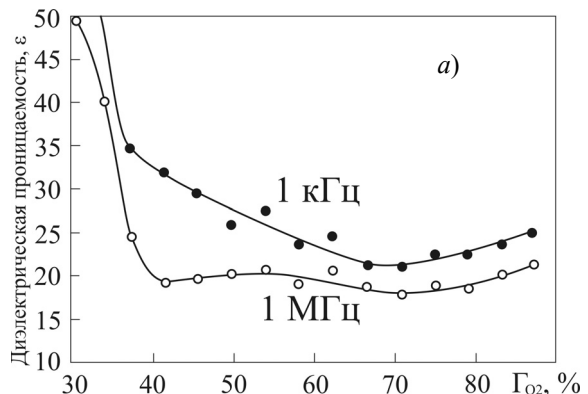


Рисунок 2.7 – Зависимости диэлектрической проницаемости (а) и тангенса угла диэлектрических потерь (б) пленок оксида тантала от концентрации кислорода в камере (совместная газоподача)

Аналогичные зависимости $\epsilon(\Gamma_{O_2})$ и $\text{tg}\phi(\Gamma_{O_2})$ были получены при раздельной газоподаче

(рисунок 2.8). В данном случае формирование диэлектрических пленок наблюдалось при концентрациях кислорода $\Gamma_{O_2} > 54,2\%$. При таких концентрациях кислорода получены пленки с диэлектрической проницаемостью $\epsilon = 32 - 42$ и тангенсом угла диэлектрических потерь $\text{tg}\phi = 0,008 - 0,02$ на частоте 1 кГц. На частоте 1 МГц диэлектрическая проницаемость и тангенс угла диэлектрических потерь составляли соответственно $\epsilon = 26 - 32$, $\text{tg}\phi = 0,28 - 0,3$. Таким образом, поведение зависимостей $\epsilon(\Gamma_{O_2})$ и $\text{tg}\phi(\Gamma_{O_2})$ при отдельной и совместной газоподаче имели сходный характер, однако при отдельной газоподаче получены пленки с более высокой диэлектрической проницаемостью и формирование таких пленок происходило при более высоких концентрациях кислорода в камере.

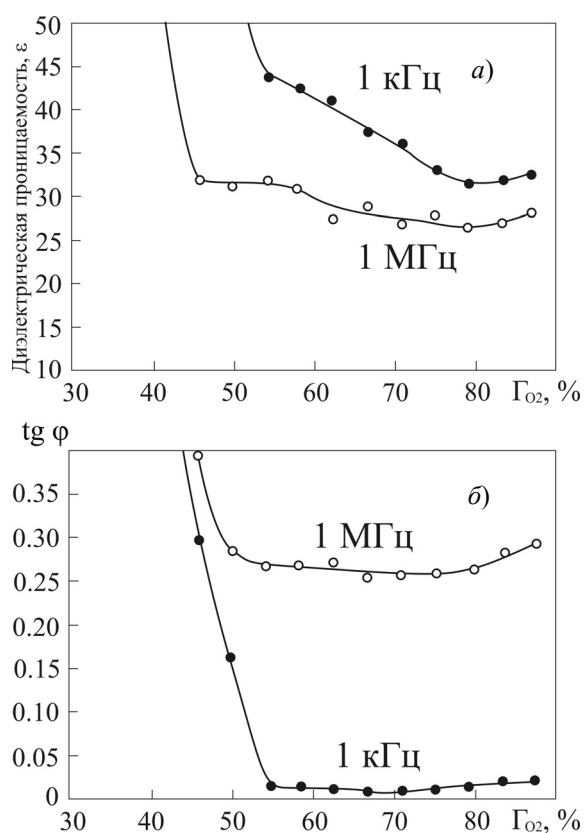


Рисунок 2.8 – Зависимости диэлектрической проницаемости (а) и тангенса угла диэлектрических потерь (б) пленок оксида тантала от концентрации кислорода в камере (раздельная газоподача)

На основе полученных экспериментальных данных для двух способов газоподачи определены концентрации кислорода в камере, при которых происходят изменения характеристик процесса и свойств пленок (таблица 2.1). Анализ полученных результатов позволяет сделать вывод, что разрядные характеристики МРС и свойства наносимых пленок зависят от способа газоподачи. При раздельной газоподаче все

зависимости смещаются в область более высоких концентраций кислорода. Это связано с тем, что при реактивном распылении формирование соединения происходит на мишени и подложке. При раздельной газоподаче кислород подается в зону подложки, а распыление мишени идет в среде Ar. Из-за более низкого парциального давления кислорода в зоне разряда образование окисной пленки на поверхности мишени происходит при более высоких концентрациях кислорода в камере. При этом скорость формирования оксида в основном определяется процессами на подложке.

Таблица 2.1 – Концентрации кислорода в камере, при которых происходят изменения характеристик процесса нанесения и свойств пленок

Характеристика	$\Gamma_{O_2}, \%$	
	Совместная газоподача	Раздельная газоподача
Максимум U_t	50	68
Переход U_t на пологий участок зависимости	63	80
Максимум скорости нанесения	30	50
Переход зависимости скорости нанесения на пологий участок	60	80
Начальное формирование оптически прозрачных пленок	37,5	54,2
Начальное формирование диэлектрических пленок	37,5	54,2
Начальное изменение профиля распределения скорости нанесения	50	67,5
Формирование профиля распределения скорости нанесения с пиком	61,7	83,3

Анализ зависимостей напряжения разряда, скорости нанесения и электрофизических характеристик пленок от концентрации кислорода в камере позволяет выделить металлический, переходной и реактивный режимы работы системы. При совместной газоподаче металлический режим распыления присутствует при концентрации кислорода от 0 до 30%. На данном участке наблюдается рост скорости нанесения и напряжения разряда. При этом формируются электропроводящие пленки оксида тантала с высоким оптическим поглощением. Переходной режим присутствует на участке от 30 до 60% O_2 , где происходит резкое снижение скорости нанесения. На данном участке при $\Gamma_{O_2} = 37,5\%$ начинают формироваться диэлектрические пленки с низким оптическим поглощением. Следует отметить, что на участке концентраций кислорода

от 30 до 50% продолжается рост напряжения разряда. Реактивный режим наблюдается при концентрациях кислорода более 60%. В этой области напряжение разряда и скорость нанесения имеют низкие значения и практически не зависят от Γ_{O_2} . На профиле распределения скорости нанесения формируется пик. Однако при этом также формируются диэлектрические пленки оксида тантала с низким оптическим поглощением. Аналогичные участки можно выделить и для отдельной газоподачи. Металлический, переходной и реактивный режимы работы системы в данном случае наблюдаются при концентрациях кислорода 0 – 50%, 50 – 80%, и более 80% соответственно. На данных участках наблюдается такой же характер изменений зависимостей параметров процесса и свойств пленок от Γ_{O_2} .

Следует отметить, что формирование пика на профиле распределения скорости нанесения связано не с изменением скорости нанесения, а с изменением напряжения разряда. Начальное изменение профиля распределения скорости нанесения для двух способов газоподачи происходит при переходе напряжения разряда через максимум на начальном участке падения напряжения разряда, а окончательное формирование пика наблюдается при переходе в реактивный режим работы, где напряжение разряда имеет низкие значения.

Формирование пика на распределениях скорости нанесения можно объяснить формированием отрицательно заряженных ионов. Ряд авторов заявлял, что при реактивном магнетронном распылении некоторых металлов при больших концентрациях кислорода в разрядной зоне магнетрона распыление окисной пленки на мишени идет не только на атомном уровне, но и в виде молекул Me_xO_y и кластеров [20]. Такие молекулы и кластеры могут иметь высокую электроотрицательность, присоединять к себе электрон и формировать отрицательно заряженный ион. Отрицательно заряженный ион ускоряется в катодном пространстве. Так как электрическое поле перпендикулярно поверхности мишени, ионы ускоряются именно в этом направлении. Поэтому угловое распределение направлений движения отрицательных ионов будет сильно вытянутым в направлении нормали к мишени, по сравнению с косинусным, и угол разлета таких ионов составляет от 10° до 30° в зависимости от рабочих параметров разряда, давления рабочего газа, напряжения разряда, содержания кислорода в рабочем газе. Данные процессы не свойственны магнетронному распылению металлических мишеней, поскольку для образования отрицательно заряженного иона необходимо, чтобы в распыляемой мишени или рабочем газе присутствовали элементы с высокой электроотрицательностью.

Заключение

На основе проведенных исследований зависимостей напряжения разряда, скорости нанесения и электрофизических характеристик пленок оксида тантала от способа газоподачи в камеру и концентрации кислорода в Ag/O_2 смеси газов выделены металлический, переходной и реактивный режимы работы системы. Показано, что режимы работы системы определяются изменением скорости нанесения пленок. Изменение профиля распределения скорости нанесения пленок связано с изменением напряжения разряда.

Установлено, что формирование диэлектрических пленок с высоким оптическим пропусканием и высокими скоростями нанесения как при совместной, так и при отдельной газоподаче возможно в переходном режиме работы системы. При совместной газоподаче предпочтительным является диапазон концентраций кислорода от 37,5 до 60%. При отдельной газоподаче область предпочтительных концентраций кислорода сдвигается в сторону более высоких концентраций кислорода (от 54,2 до 80%). Смещение режимов работы системы при отдельной газоподаче в область более высоких концентраций кислорода связано с уменьшением парциального давления кислорода в разрядной зоне магнетрона и, как следствие, уменьшением «отравления» мишени. При этом скорость образования оксида, в первую очередь, определяется процессами на подложке. Применение отдельной газоподачи не дает преимуществ в свойствах пленок. Однако при отдельной подаче газов минимизируется отравление поверхности мишени, что позволяет значительно уменьшить вероятность дугообразования и повысить стабильность процесса реактивного распыления.

ЛИТЕРАТУРА

1. Cox, P.A. Transition metal oxides: An introduction to their electronic structure and properties / P.A. Cox. – Oxford university press, 2010. – 294 p.
2. Tantalum pentoxide (Ta_2O_5) thin films for advanced dielectric applications / C. Chaneliere [et al.] // Materials Science and Engineering: R: Reports. – 1998. – Vol. 22, № 6. – P. 269–322.
3. Jian, F.-X. Tantalum oxide thin films for microelectronic applications / Fang-Xing Jian, S.K. Kurinec // Proceedings of the Eleventh Biennial University / Government / Industry Microelectronics Symposium, 1995. – P. 101–104.
4. Christensen, C. Tantalum oxide thin films as protective coatings for sensors / C. Christensen, R. de Reus, S. Bouwstra // Technical Digest. IEEE International MEMS 99 Conference. Twelfth IEEE International Conference on Micro Electro Mechanical Systems (Cat. No.99CH36291). – 1999. – P. 267–272.
5. Macagno, V. The growth and properties of thin oxide layers on tantalum electrodes /

- V. Macagno, J.W. Schultze // *Journal of Electroanalytical Chemistry and Interfacial Electrochemistry*. – 1984. – Vol. 180, № 1–2. – P. 157–170.
6. Wolten, G.M. Single-crystal data for β -Ta₂O₅ and A -KPO₃ / G.M. Wolten, A.B. Chase // *Zeitschrift für Kristallographie*. – 1969. – Vol. 129, № 5–6. – P. 365–368.
7. *Structures and phase transitions of β -Ta₂O₅ and Z -Ta₂O₅: two high-pressure forms of Ta₂O₅* / I.P. Zibrov [et al.] // *Acta Crystallographica Section B*. – 2000. – Vol. 56, № 4. – P. 659–665.
8. *Amorphous tantalum and its relationship with the molten state* / O.L.G. Alderman [et al.] // *Physical Review Materials*. – 2018. – Vol. 2, № 4. – P. 043602.
9. Robertson, J. High-K materials and metal gates for CMOS applications / J. Robertson, R.M. Wallace // *Materials Science and Engineering R*. – 2015. – Vol. 88. – P. 1–41.
10. *Review and perspective of high-k dielectrics on silicon* / S. Hall [et al.] // *J. of Telecommunications and Information Technology*. – 2007. – Vol. 2. – P. 33–43.
11. *Use of anodic tantalum pentoxide for high-density capacitor fabrication* / S. Duenas [et al.] // *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*. – 1999. – Vol. 10, № 5–6. – P. 379–384.
12. *Evanescent field sensors based on tantalum pentoxide waveguides – A Review* / K. Schmitt [et al.] // *Sensors*. – 2008. – Vol. 8. – P. 711–738.
13. *Tantalum oxynitride thin films: assessment of the photocatalytic efficiency and antimicrobial capacity* / D. Cristea [et al.] // *Nanomaterials*. – 2019. – Vol. 9. – P. 476.
14. Берлин, Е. В. Получение тонких пленок реактивным магнетронным распылением / Е.В. Берлин, Л.А. Сейдман. – Москва: Технофера, 2014. – 255 с.
15. Kadlec, S. Hysteresis effect in reactive sputtering: a problem of system stability / S. Kadlec, J. Musil, H. Byskocil // *J. Phys. D*. – 1986. – Vol. 19, № 9. – P. L187–L190.
16. Sproul, W.D. Control of reactive sputtering processes / W.D. Sproul, D.J. Christie, D.C. Carter // *Thin Solid Films*. – 2005. – Vol. 491. – P. 1–17.
17. *Магнетронное осаждение пленок оксида тантала с электретным зарядом* / А.П. Бурмаков, В.Н. Кулешов / 8-я международная конференция «Взаимодействие излучений с твердым телом», 23–25 сентября 2009 г., Минск, Беларусь. – С. 302–304.
18. *Формирование пленок нитрида титана методом реактивного магнетронного распыления при пониженном давлении* / А.П. Достанко [и др.] // *Проблемы физики, математики и техники*. – 2016. – № 2 (27). – С. 12–17.
19. *Формирование пленок оксида тантала на подложках диаметром 200 миллиметров* / Н. Вилья [и др.] // *Проблемы физики, математики и техники*. – 2020. – № 1 (42). – С. 12–17.
20. *Effects of energetic ion bombardment on structural and electrical properties of Al-doped ZnO films deposited by RF-superimposed DC magnetron sputtering* / Norihiro Ito [et al.] // *Jap. J. Appl. Phys.* – 2010. – Vol. 49. – P. 071103.

Поступила в редакцию 25.04.2022.

Информация об авторах

Доан Хоанг Тхе – аспирант
Голосов Дмитрий Анатольевич – к.т.н., доцент
Бурдовицин Виктор Алексеевич – д.т.н., профессор
Завадский Сергей Михайлович – к.т.н., доцент
Мельников Сергей Николаевич – к.т.н.