

ИССЛЕДОВАНИЕ МЕТОДА ВЧ МАГНЕТРОННОГО ФОРМИРОВАНИЯ
КОНДЕНСАТОВ И НЕКОТОРЫХ СВОЙСТВ ПОЛУЧЕННЫХ СЛОЕВ
ОКСИДА АЛЮМИНИЯ

В.Г.Надалка, И.В.Лунев

Важной проблемой машиностроения является повышение надежности и долговечности машин и механизмов. Решение этой задачи тесно связано с созданием материалов, обеспечивающих повышенные эксплуатационные характеристики изделий. Среди известных методов изменения поверхностных свойств важную область занимают ионно-плазменные процессы, которые позволяют получать поверхностные слои со специальными физико-механическими свойствами.

Высокочастотный магнетронный метод позволяет формировать с высокой производительностью высококачественные беспористые покрытия на основе диэлектриков. При этом наиболее перспективны магнетронные системы планарного типа, которые позволяют получать равнотолщинные покрытия на подложках большой площади.

Покрытия на основе оксида алюминия получили распространение в различных областях техники вследствие их жаропрочности, высокой твердости, низкой теплопроводности, коррозионной стойкости.

Для формирования диэлектрических покрытий разработана высокочастотная установка магнетронного типа, созданная на базе вакуумной системы ВУ-1Б. Магнетрон с плоской дисковой мишенью из оксида алюминия диаметром 90 мм представлял собой планарную диодную систему. Катодом служил распыляемый материал, расстояние между катодом и кольцевым анодом превышало расстояние между катодом и виртуальным анодом. Высокочастотное напряжение (1,65 МГц) подавалось на катод магнетрона с генератора - средневолновой радиостанции Р-820.

Изучение вольт-амперных характеристик разряда показало, что при сравнительно больших давлениях ($1 \div 6$ Па) ВАХ разряда имеет ярко выраженный нелинейный характер, а при малых давлениях ($\sim 0,1$ Па) характеристика стремится к линейной зависимости, причем в этом случае ВАХ сдвигается в область более высоких рабочих напряжений.

Параметры плазмы на оси разряда высокочастотного планарного магнетрона (потенциал, электронная температура, плотность) исследованы с помощью одиночных и двойных электрических зондов.

Плазма разряда имеет положительный потенциал (рис. 1а). При удалении от катода потенциал плазмы уменьшается, достигая практически неизменного значения на расстоянии 5–10 см, т.е. в этой области потенциал плазмы однороден и плазма квазинейтральна. В более близких к катоду областях плазма менее скомпенсирована, что вызывает увеличение потенциала плазмы. При увеличении давления граница квазинейтральности приближается к катоду, что вызвано увеличением плотности плазмы и снижением подвижности заряженных частиц.

Электроны, вышедшие из области разряда (область магнитной ловушки), приобретают максимальную температуру в области перехода нескомпенсированной плазмы у катода в квазинейтральную. В целом температура электронов в плазме меняется в пределах $2 \div 6$ эВ (рис. 1б). Область максимальной плотности плазмы на оси системы находится от катода на расстоянии, близком к среднему радиусу зоны эрозии катода-мишени (рис. 1в).

В случае планарной магнетронной системы ионного распыления с ограниченной зоной эрозии поверхности мишени возможно значительное (по сравнению с обычной диодной системой) изменение распреде-

ления толщины пленки по обрабатываемой поверхности. Кроме того, в области энергий ионов (0,5 + 1,0 кэВ), бомбардирующих мишень в системах вч-магнетронного распыления, существует сильная зависимость углового распределения эмиттированных из мишени частиц как от материала мишени, так и от энергии бомбардирующих мишень ионов, что также может иметь сильное влияние на распределение толщины получаемого покрытия.

Выполнены теоретические расчеты распределения толщины получаемого покрытия по радиусу магнетронной системы с кольцевой зоной эрозии при различных функциях углового распределения эмиттированных мишенью атомов:

$$f(\gamma) = \cos \gamma + a \cos^3 \gamma,$$

где γ - угол эмиссии по отношению к нормали к мишени, a - переменный параметр, отражающий отклонение углового распределения от косинусоидальной зависимости. Результаты расчетов, подтвержденные данными экспериментов, показали, что распределение пленки по ее толщине на поверхности конденсации практически не зависит от функции углового распределения эмиссии частиц. Более того, это распределение слабо зависит от относительной ширины зоны эрозии. Таким образом, при расчетах распределения толщины пленки по поверхности конденсации можно с достаточной точностью делать предположение о косинусном законе распределения эмиттированных частиц. Более того, кольцевую зону эрозии можно заменять диском, радиус которого равен среднему радиусу кольцевого источника.

Одним из перспективных методов защиты металлов от коррозии в агрессивных средах является нанесение антикоррозионных защитных покрытий. Защитные свойства таких покрытий определяются рядом факторов, немаловажным из которых является их низкая пористость.

В данной работе исследовано влияние технологических параметров получения тонких слоев Al_2O_3 на их пористость и электрическую прочность.

Зависимости плотности пор, распределения пор по размерам и электрической прочности пленок от соответствующего параметра их формирования регистрировались при фиксированных значениях остальных параметров - толщине пленки $d = 200$ нм, скорости осаждения $v = 17$ нм/мин, температуре осаждения $T_0 = 270^\circ\text{C}$, напряжении смещения на подложке $U_{см} = -50$ В.

Сквозная пористость пленок (для пор диаметром более 30 нм) исследовалась электрохимическим методом. Электрическая прочность пленок определялась по ходу вольт-амперной характеристик; в качестве электродов использовались подслои хрома и внешний ртутный контакт.

На рис. 2 представлены зависимости плотности сквозных пор в пленках окиси алюминия от параметров их осаждения. С увеличением толщины пленки наблюдается тенденция к уменьшению плотности сквозных пор (рис. 2а); при толщинах, больших 200 нм, эта тенденция заметно ослабевает, что свидетельствует об окончании процесса срастания агрегатов зародышей пленки. Аналогично ведет себя плотность сквозных пор при увеличении скорости осаждения слоя (рис. 2б). В этом случае увеличение скорости осаждения слоя приводит к уменьшению отношения скорости поступления на поверхность конденсации аргона и остаточных газов к скорости поступления частиц осаждаемого материала, что определяет увеличение подвижности адатомов на поверхности конденсации и способствует лучшему залечиванию образовавшихся дефектов пленки.

На рис. 2в и 2г представлены зависимости плотности сквозных микропор от температуры подложки и от величины отрицательного

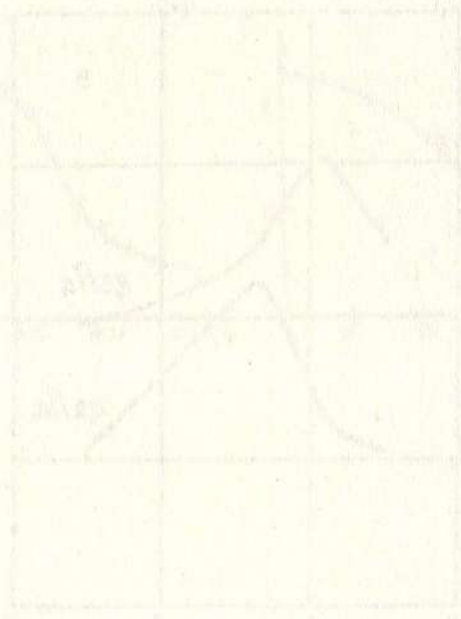
напряжения смещения, подаваемого на подложку. По этим зависимостям можно судить о поведении пористости при изменении поверхностной подвижности адатомов как за счет температуры поверхности, так и изменения энергии осаждаемых частиц. Указанные зависимости имеют аналогичный вид: с ростом подвижности адатомов наблюдается уменьшение плотности сквозных микропор. На обеих зависимостях существует область резкого уменьшения пористости, что, по-видимому, вызвано возможностью преодоления осаждаемыми частицами потенциальных барьеров, которые создаются на поверхности атомами остаточных газов либо их скоплениями и ограничивают миграционную способность атомов осаждаемого материала.

Построены также функции распределения пор по размерам для пленок Al_2O_3 в зависимости от параметров их формирования. Во всех случаях эти функции имеют вид нормального распределения с максимумом, лежащим в области 150 ± 600 нм. При увеличении температуры осаждения, скорости роста пленки, толщины пленки и величины отрицательного потенциала смещения наблюдается кроме общего уменьшения плотности сквозных пор в пленках сдвиг средневзвешенного значения размера пор в область меньших величин.

Наряду с характеристиками пористости пленок оксида алюминия, полученных при различных значениях параметров процесса их формирования, изучена электрическая прочность данных конденсаторов. Результаты этих исследований приведены на рис. 3. При увеличении температуры осаждения в интервале $300 \pm 600^\circ C$ электрическая прочность пленок растет, что связано со снижением плотности дефектов в пленках и подтверждается уменьшением плотности сквозных микропор и их средневзвешенного размера. С ростом толщины электрическая прочность пленок уменьшается. По-видимому, снижение электрической прочности пленок при увеличении их толщины и скорости фор-

мирования связано с ростом механических остаточных напряжений в пленках. С ростом величины отрицательного напряжения смещения, подаваемого на подложку в процессе конденсации пленки, происходит увеличение миграционной способности адатомов, что приводит к росту более совершенной кристаллической структуры и увеличению электрической прочности пленок.

Таким образом, для формирования в высокочастотном магнетронном разряде высококачественных слоев на основе оксида алюминия должны быть обеспечены условия повышенной миграции адатомов по поверхности конденсата.



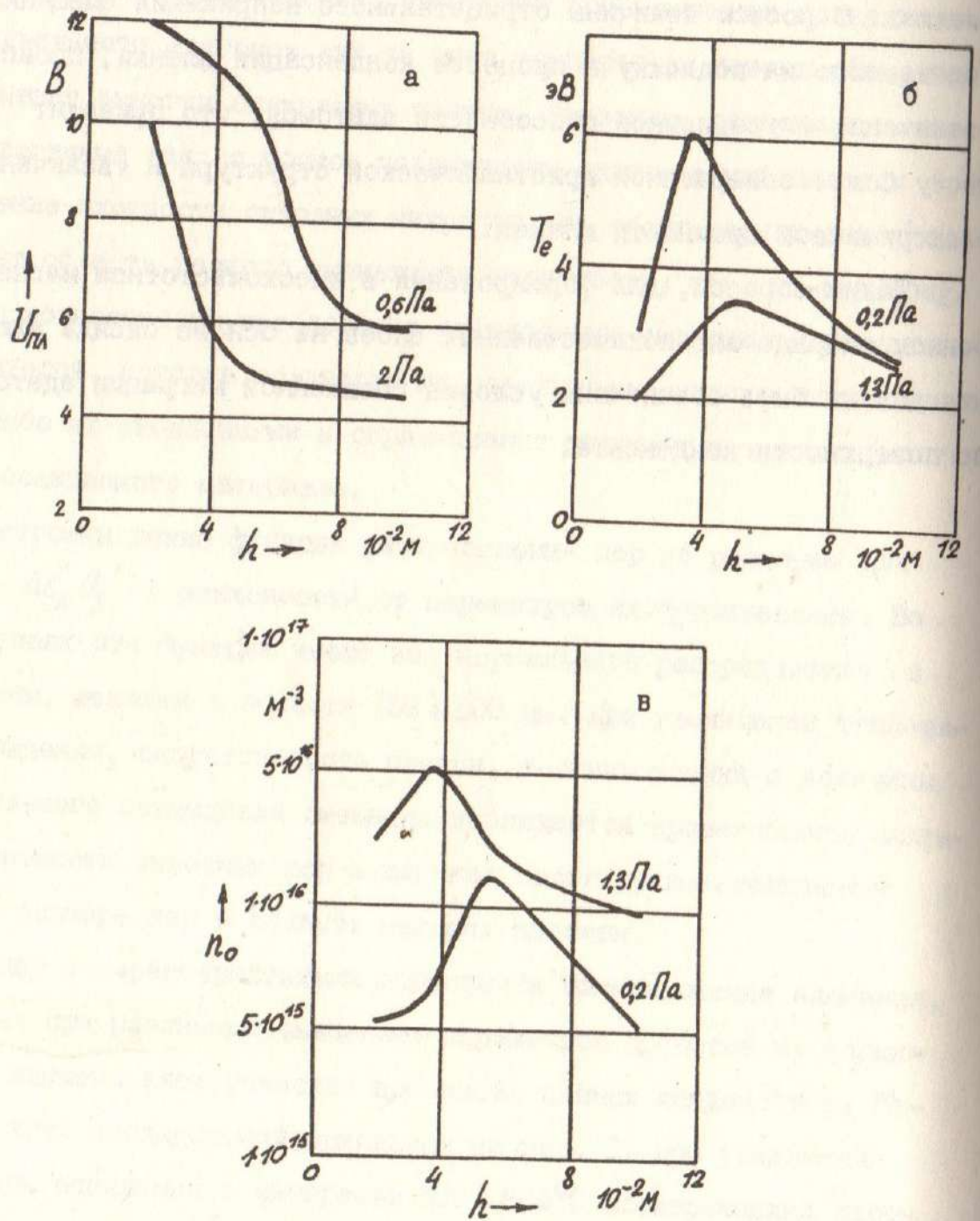


Рис. I. Зависимости параметров плазмы на оси системы от расстояния до катода — мишени.

- а — потенциал плазмы;
- б — электронная температура;
- в — плотность плазмы.

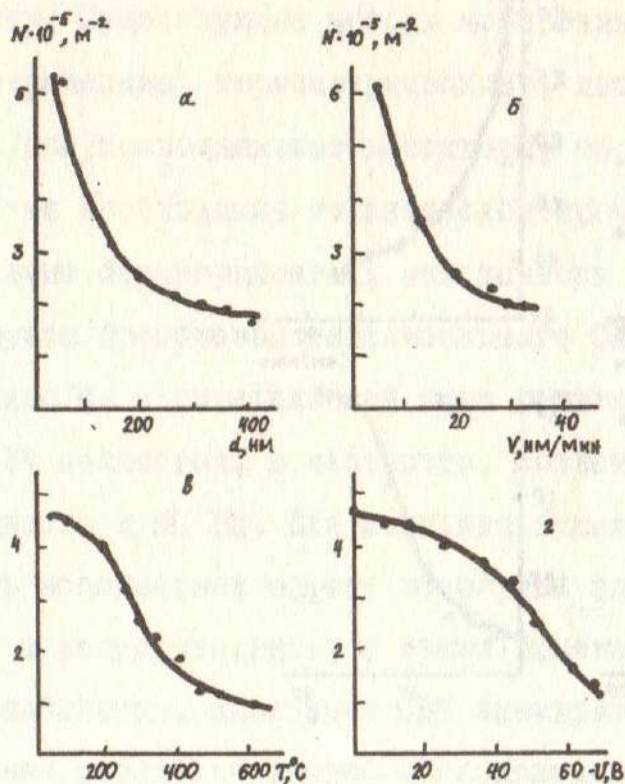


Рис.2. Зависимости плотности сквозных пор в пленках окиси алюминия от параметров их осаждения: толщины пленки (а), скорости роста (б), температуры подложки (в), напряжения смещения (г).

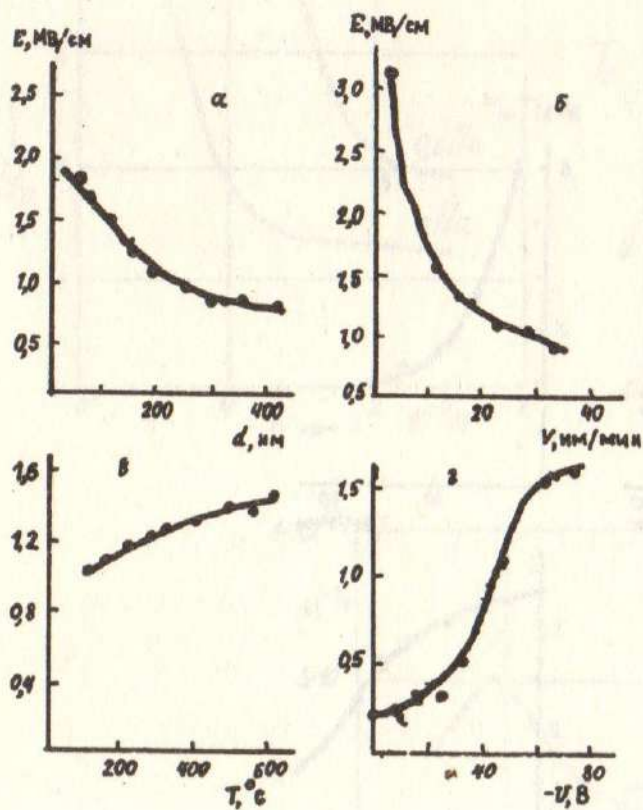


Рис.3. Зависимости диэлектрической прочности пленок окиси алюминия от параметров их осаждения: толщины пленки (а), скорости роста (б), температуры подложки (в), напряжения смещения (г).