

СИНТЕЗ ТОНКИХ ПЛЕНОК ОКСИДА АЛЮМИНИЯ ПРЯМЫМ ОСАЖДЕНИЕМ ИЗ ИОННЫХ ПУЧКОВ

Е.В. Телеш, Н.Д. Гутенко, Е.Ю. Перепечко

*Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники,
Минск, Беларусь*

Экспериментально исследовано влияние парциального давления кислорода в рабочем газе на электрофизические, оптические и структурные характеристики пленок из оксида алюминия, полученных осаждением из ионных пучков. Установлено, что пропускание резко растет уже при парциальном давлении кислорода $8 \cdot 10^{-3}$ Па, составляет 88–92 % в видимой и инфракрасной областях спектра, что свидетельствует об интенсивном окислении атомов алюминия. Покрытия обладали $n = 1,55 \dots 1,63$, что совпадает с коэффициентами преломления пленок диоксида алюминия. Установлено, что значения диэлектрической проницаемости ϵ и удельного объемного сопротивления ρ_v увеличивались, а тангенса диэлектрических потерь $\text{tg}\delta$ – уменьшались с ростом парциального давления кислорода в рабочем газе. Коэффициент трения снижается при увеличении парциального давления кислорода. Это можно объяснить формированием более твердой фазы, включающей соединения алюминия с кислородом. Установлено, что покрытия обладали мелкозернистой аморфной структурой и имели хорошую адгезию к подложкам.

Ключевые слова: *ионные пучки, тонкие пленки, оксиды алюминия, электрофизические характеристики, оптические характеристики, структурные характеристики.*

Благодаря своей превосходной химической стабильности в сочетании с выгодными механическими свойствами тонкопленочные покрытия из оксидов алюминия вызывают все больший интерес в качестве покрытий для защиты от износа и коррозии при высоких температурах, в качестве диффузионных барьеров, волноводов и оптических покрытий в оптике [1, 2], пассивирующих и диэлектрических слоев в микроэлектронике [3]. Для формирования тонких пленок Al_2O_3 применяется реактивное магнетронное распыление, химическое и плазмохимическое осаждение из газовой фазы, атомно-слоевое осаждение [4]. Весьма перспективным методом является синтез пленок непосредственно из пучков ионов [5]. Возможность управления энергией осаждаемых ионов позволяет изменять адгезию пленок к подложке, структуру и состав растущей пленки, а, следовательно, и ее свойства.

Изменяя энергию, величину, состав и направленность потока осаждаемых частиц можно управлять электрофизическими, оптическими, структурными и механическими свойствами формируемых слоев. Целью настоящей работы является исследования влияния состава рабочего газа на электрофизические, оптические и структурные характеристики пленок из оксидов алюминия.

Исследования осуществляли с использованием ускорителя с анодным слоем, работающего в режиме ионно-пучкового фокуса. Схема проведения экспериментов представлена на рисунке 1, а. Ускоритель 1 генерировал первичный пучок из ионов аргона и кислорода 6, который распылял диафрагму 2 из алюминия.

Магнитное поле, создаваемое дополнительным магнитом 5, способствовало формированию вторичного плазменного разряда 4, состоящего из ионов алюминия, кислорода и аргона. Вторичный ионный пучок через отверстие в диафрагме попадал на подложку 3. Энергия ионов вторичного пучка зависела от величины положительного напряжения на диафрагме U_D , которое могло варьироваться путем изменения сопротивления переменного резистора 7. Внешний вид ионного пучка показан на рисунке 1, б.

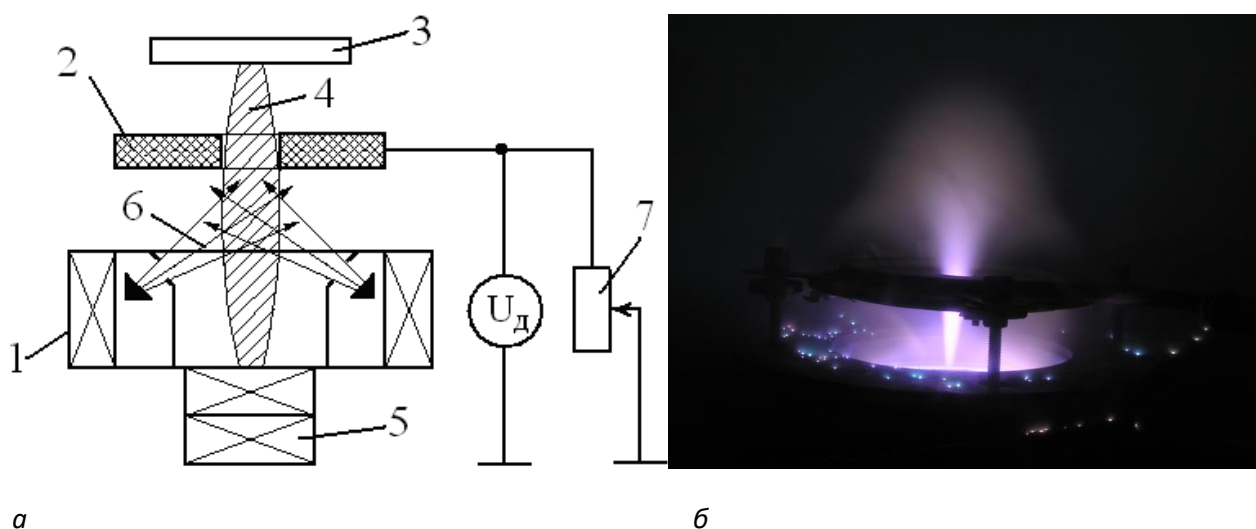


Рисунок 1. – Схема проведения экспериментов (а) и внешний вид ионного пучка (б)

Покрyтия наносили на подложки из кремния и стекла. Остаточный вакуум был не выше $3,3 \cdot 10^{-3}$ Па, рабочее давление – $3,7 \cdot 10^{-2}$ Па, ускоряющее напряжение на аноде – $U_a = 2,5$ кВ, ток разряда – 60–63 мА, температура подложки – 310 К, напряжение на диафрагме отсутствовало. Толщину покрытий измеряли с использованием микроскопа-микрoинтерферометра МИИ-4. Она составила 100...120 нм.

Исследование оптического пропускания покрытий показало, что прозрачность на $\lambda = 555$ нм резко растет уже при парциальном давлении кислорода $8 \cdot 10^{-3}$ Па, что свидетельствует об интенсивном окислении атомов алюминия (рис. 2, а). Этому способствует также невысокая скорость нанесения и относительно низкий уровень остаточного вакуума в камере.

На рисунке 2, б представлена спектральная зависимость оптического пропускания пленок при парциальном давлении кислорода $1,2 \cdot 10^{-2}$ Па.

Установлено, что покрытие обладало высоким пропусканием 88–92 % в видимой и инфракрасной областях спектра. Измерение коэффициента преломления на эллипсометре ЛЭФ-3 показало, что покрытия обладали $n = 1,55 \dots 1,63$, что совпадает с коэффициентами преломления пленок диоксида алюминия.

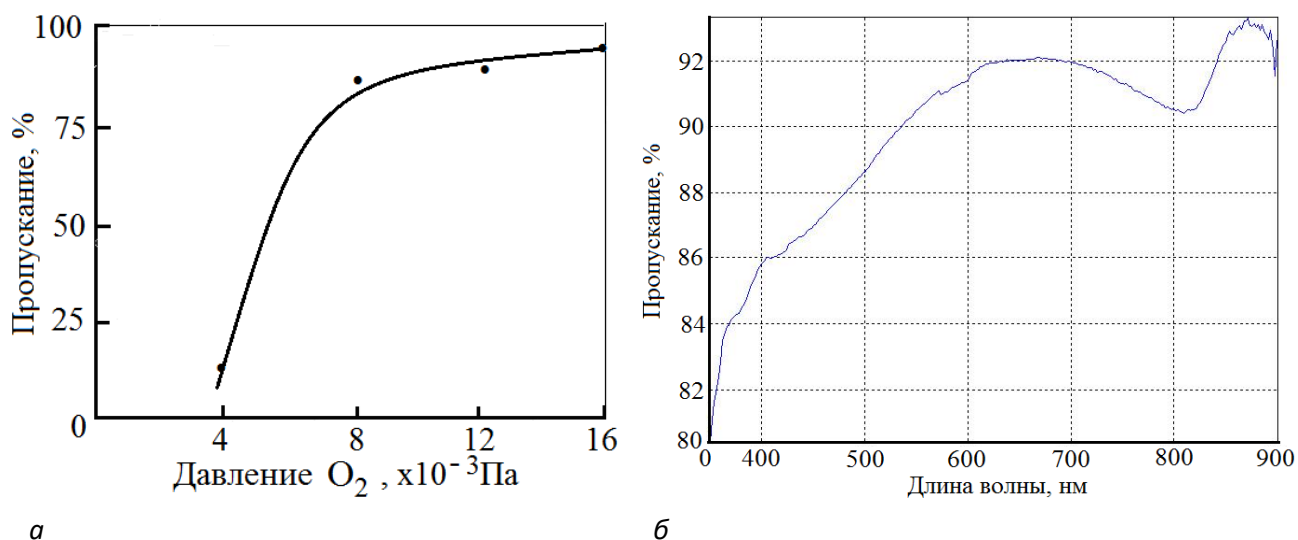


Рисунок 2. – Зависимость оптического пропускания на $\lambda = 555$ нм пленок из оксида алюминия (а) и спектральная зависимость оптического пропускания пленок (б)

Для измерения электрофизических параметров применяли МДП структуры. Измерения проводили на частоте 1 МГц. Установлено, что значения диэлектрической проницаемости ϵ и удельного объемного сопротивления ρ_v увеличивались, а тангенса диэлектрических потерь $\text{tg}\delta$ – уменьшались с ростом парциального давления кислорода в рабочем газе (табл. 1). Это свидетельствует об интенсивном окислении алюминия.

Таблица 1. – Результаты измерений электрофизических и механических характеристик покрытий

№ обр.	Давление O_2 , Па	ϵ	$\text{tg}\delta$	ρ_v , Ом·м	k
1	$4,0 \cdot 10^{-3}$	5,0	0,75	$0,7 \cdot 10^4$	0,90
2	$8,0 \cdot 10^{-2}$	6,3	0,08	$3,1 \cdot 10^4$	0,70
3	$1,2 \cdot 10^{-2}$	8,5	0,05	$3,7 \cdot 10^4$	0,65
4	$1,6 \cdot 10^{-2}$	9,6	0,04	$4,6 \cdot 10^4$	0,56

Измерение коэффициента трения k с применением микротрибометра МТ-25 показало, что коэффициент трения снижается при увеличении парциального давления кислорода. Это можно объяснить формированием более твердой фазы, включающей соединения алюминия с кислородом.

Проведено исследование структурно-фазовых характеристик пленок алюминия с применением рентгеновской дифрактометрии. На рисунке 3, а приведена рентгенограмма пленки на основе алюминия, полученной при парциальном давлении кислорода $1,2 \cdot 10^{-2}$ Па. Установлено, что покрытия обладали мелкозернистой аморфной структурой.

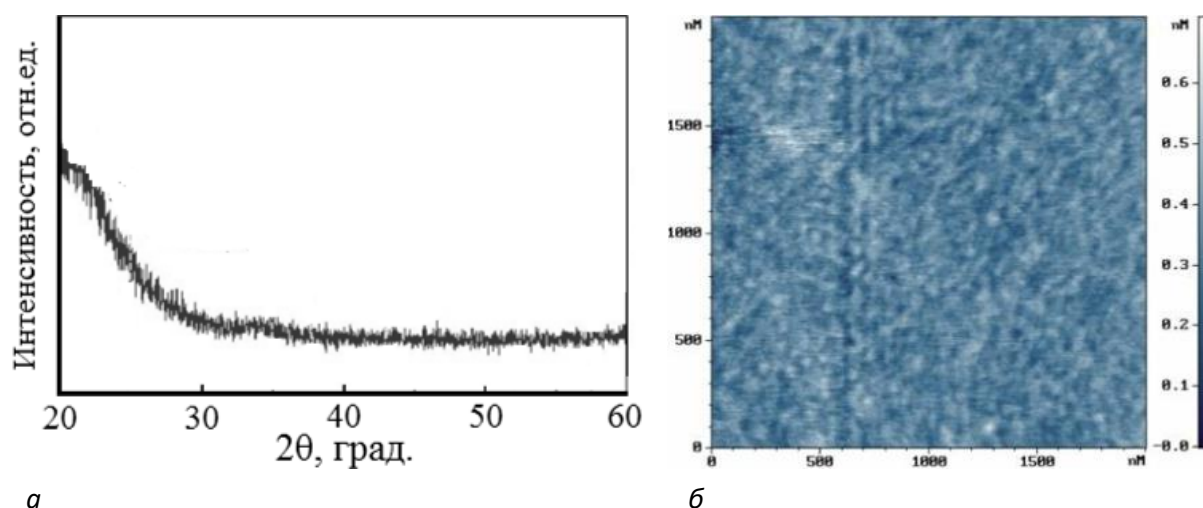


Рисунок 3. – Рентгенограмма пленки на основе алюминия, полученной при парциальном давлении кислорода $1,2 \cdot 10^{-2}$ Па (а)

На рисунке 3, б приведено изображение поверхности покрытий, которое подтверждает наличие вышеуказанной структуры.

Оценка адгезии покрытий с применение отрыва липкой ленты (скотча) показала, что они прошли тест в широком диапазоне парциальных давлений кислорода.

ЛИТЕРАТУРА

1. Demirtas, M. Low loss atomic layer deposited Al₂O₃ waveguides for applications in on-chip optical amplifiers / C. Odaci, N.K. Perkgoz, C. Sevik // IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron. – 2018. – V. 24(4). – 3100508.
2. Wang, Z. Y. The impact of thickness and thermal annealing on refractive index for aluminum oxide thin films deposited by atomic layer deposition / Z.Y. Wang et al. // Nanoscale Res. Lett. – 2015. – V. 10. – PP. 46–51.
3. Wang, Y. Experimental characterization of ALD grown Al₂O₃ films for microelectronic applications / Y. Wang et al. // Advanced in Materials Physics and Chemistry. – 2021. – V. 11. – No 1. – PP. 231–238.
4. Groner, M.D. Low-Temperature Al₂O₃ Atomic Layer Deposition/ M.D. Groner, F. H. Fabreguette, J. W. Elam, and S. M. George // Chem. Mater. – 2004. – V.16. – PP. 639–645.
5. Телеш, Е.В. Применение вторичного разряда в ускорителе с анодным слоем для формирования оптических покрытий из диоксида кремния. / Е.В. Телеш, А.П. Достанко. Контенант. – 2014. – Т. 13. – № 2. – С. 31–33.