

Динамика формирования поверхности проводящих пленок алюминия на аморфных подложках

В. В. Старостенко, А. С. Мазинов, И. Ш. Фитаев, Е. П. Таран, В. Б. Орленсон

В работе рассматривается динамика роста тонких пленок алюминия на стеклянной подложке с неоднородностями порядка 15 нм и шероховатостью поверхности порядка 2 нм. В качестве объекта исследования использовались пленки алюминия, осажденные в условиях промышленного вакуума. Показан характер изменения рельефа металлических пленок алюминия с увеличением объемной массы. Произведен анализ морфологии поверхности подложки, в качестве которой используется стекла, предназначенные для высококачественной рентгеновской фотографии.

Ключевые слова: морфология поверхности, атомно-силовая микроскопия, тонкие проводящие пленки, шероховатость поверхности.

Ссылка: Старостенко В. В., Мазинов А. С., Фитаев И. Ш., Таран Е. П., Орленсон В. Б. // Прикладная физика. 2019. № 4. С. 60.

Reference: V. V. Starostenko, A. S. Mazinov, I. Sh. Fitaev, E. P. Taran, and V. B. Orleson, Prikl. Fiz., No. 4, 60 (2019).

Введение

Неуклонный рост степени интеграции современной электроники требует постоянно уменьшения линейных размеров функциональных элементов. Уже сегодня промышленная технология производства интегральных микросхем предполагает использование рабочих слоёв, размеры которых достигают десятков и даже единиц нанометров [1].

Проводящие пленки вынесены за поверхность с активными элементами и не определяют степень интеграции, а поэтому к их

толщине не предъявляются особые требования. В то же время свойства проводящих пленок толщиной менее 10 нм исследованы недостаточно. Экспериментальные исследования показывают, что такие пленки имеют аномально большое поглощение (до 50 %) электромагнитного излучения, практически не зависящее от частоты в диапазоне частот 1–200 ГГц [2, 3]. При объяснении этого явления используются понятия из скин-эффекта и предположения о пространственной и физической однородности пленок, что, видимо, не отвечает реальной структуре пленок. В то же время поверхностные свойства подложки и пленки во многом определяют физические и электродинамические свойства металлodieлектрических структур (МДС) [4].

Целью данной работы является исследование структуры подложек и динамики роста проводящих пленок оптическими методами, а также с использованием атомно-силовой микроскопии.

Обоснование выбора объекта исследования

В качестве исследуемых МДС использовались структуры из стеклянных подложек и

Старостенко Владимир Викторович, профессор, д.ф.-м.н.

Мазинов Алим Сеит-Аметович, доцент, к.т.н.

Фитаев Ибраим Шевкетович, аспирант.

Таран Евгений Владимирович, доцент, к.ф.-м.н.

Орленсон Вульф Борисович, аспирант.

Крымский федеральный университет

им. В. И. Вернадского.

Россия, Республика Крым, 295007, г. Симферополь,

просп. Вернадского, 4.

Тел. +7(3652) 54-50-36. E-mail: mazinovas@cfuv.ru

Статья поступила в редакцию 23 мая 2019 г.

© Старостенко В. В., Мазинов А. С.-А., Фитаев И. Ш., Таран Е. В., Орленсон В. Б., 2019

проводящих пленок из алюминия. Выбор типа подложек определялся тем, что природа роста пленок на поверхностях, обладающих неоднородностями геометрии менее 1 нм, относительно хорошо изучена [6], тогда как осаждение пленок на рельеф с неоднородностями в единицы нанометров, что приближено к промышленному производству, требует дополнительных исследований. Поэтому из серии образцов, проходящих тестирование на взаимодействие с электромагнитным полем [5], были отобраны МДС на стеклянных подложках, предназначенных для высококачественной рентгеновской фотографии, с перепадами высот до 8 нм.

Выбор метода нанесения был обусловлен тем, что экспериментальная установка на базе вакуумного поста УРМ 3.1279.0129, обеспечивающая рабочее давление 10^{-2} Па при остаточном давлении 10^{-3} Па, является установкой полупромышленного масштаба, что приближает процесс получения лабораторных образцов к промышленному. Регулировкой скорости вращения и временем распыления алюминиевой мишени были нанесены пленки, причем с временем напыления 4, 11,5, 19, 26 и 38 секунд.

Первоначальный анализ поверхности образцов производился с помощью оптического интерференционного микроскопа ЛОМО МИИ-4М и сканирующего зондового микроскопа СЗМ NT-MDT НАНОЭДЬЮКАТОР II (способного работать в качестве атомно-силового и сканирующего туннельного микроскопов – АСМ и СТМ) с разрешением по X - $Y \sim 50$ нм, по $Z \sim 2$ нм. После этого выбирались наиболее характерные области, которые сканировались с пространственным разрешением по X - $Y \sim 0,3$ нм, а по $Z \sim 0,02$ нм на СЗМ NT-MDT INTEGRA (сканирующий зондовый микроскоп для решения широкого спектра задач в области атомно-силовой микроскопии).

Морфология: динамика и анализ

Используемые в экспериментальных исследованиях стеклянные подложки хотя и превосходили по качеству прокатные, но все же обладали рядом дефектов. АСМ-исследования (см. рис. 1, слой Substrate) показали наличие нанообъектов с относительно равномерным распределением на поверхности подложки и

формой, близкой к полусферической. В основном латеральные дефекты подложки не превосходили по площади 1×1 мкм², а средний размах высот Z_d исследуемых участков поверхности подложки составил 10 ± 5 нм. Атомно-силовое сканирование выбранных участков позволило более детально изучить базисный рельеф и показало 20 % совпадение перепада высот. Так, максимальная разность высот составила 15,82 нм, средняя шероховатость 1,11 нм, среднеквадратичная шероховатость 1,42 нм. Наличие относительно высоких, но достаточно редких пиков обусловлено неидеальностью процесса полупромышленного получения подложек и характеризуется наличием микрообразований, разломов и т. п.

Дальнейшие исследования, проводимые уже после напыления алюминиевого слоя, показали, что поверхность пленки переходит от образований в виде распределения наночастиц к непрерывному распределению проводящего слоя на поверхности МДС. Динамика последовательного изменения рельефа поверхности от чистой подложки (слой Substrate) до слоя алюминия, образованным напылением на протяжении 19 секунд, показана на рис. 1. Так как методами АСМ снимается только профиль поверхности, а не толщина слоя, то приведенные в рис. 1 пределы высот уменьшаются с увеличением толщины проводящего слоя.

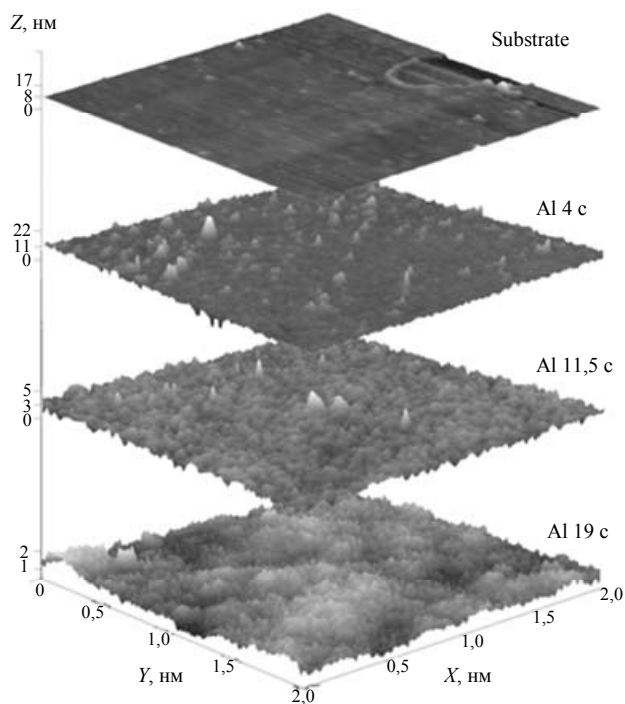


Рис. 1. Динамика изменения рельефа МДС при увеличении времени напыления до 19 с.

Замечено появление макрочастиц, число которых на поверхности растет с увеличением толщины пленки. Это может быть обусловлено тем, что вследствие магнетронного метода напыления наиболее высокоэнергетические ионы аргона выбивают не один атом из горячей мишени, а группу атомов или даже микрочастички вещества. Также образование этих объектов может быть обусловлено силами Ван-дер-Ваальса.

Для более подробного изучения зависимости морфологий поверхности пленки было проведено дополнительное исследование пленок алюминия, образованные при увеличении длительности времени напыления, а именно, в течение 26 и 38 секунд (рис. 2), а также исследование границы пленочного покрытия (рис. 2, нижний слой).

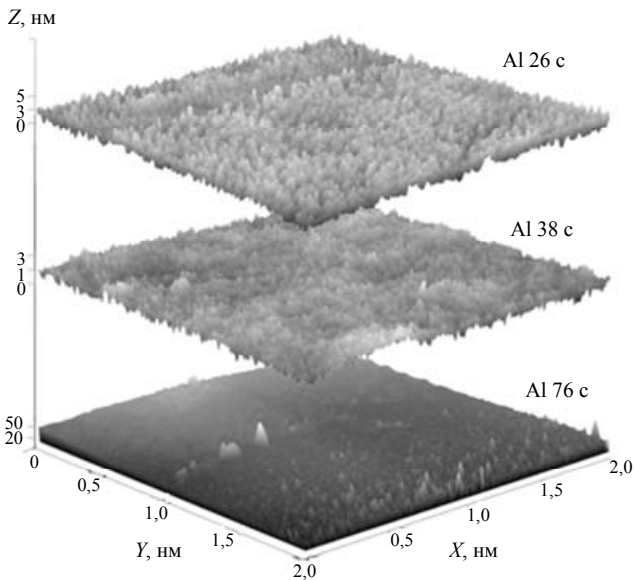


Рис. 2. Динамика изменения рельефа МДС при увеличении времени напыления до 76 с.

Исследование методами АСМ границы перехода «подложка–пленка» (время напыления 76 с, рис. 2, нижний слой) показало наглядное изменение шероховатости при переходе от подложки к пленке. Профилограмма поверхности имеет достаточно плавный градиент перехода. Толщина пленки, которая оценивается как средняя высота «ступеньки» между областями с большей шероховатостью и относительно гладкой поверхностью осажденного материала, составила порядка 20 нм.

Перед напылением пленки на поверхность подложки был установлен экран, пре-

пятствующий нанесению материала на локальный участок подложки. Таким образом можно получить границу перехода подложки в проводящий слой.

Динамика изменения средней шероховатости и разности высот в зависимости от времени напыления пленки нелинейна, что продемонстрировано на рис. 3.

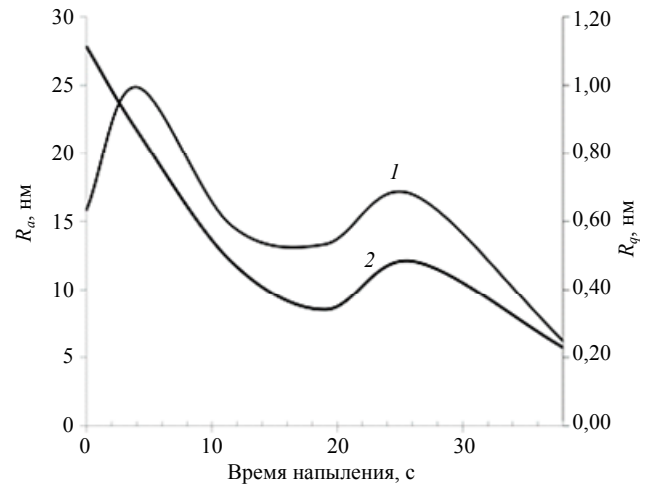


Рис. 3. Изменения характеристик поверхностей с увеличением толщины пленки: 1 – R_q максимальный размах высот; 2 – R_q средняя шероховатость поверхности.

Из рис. 3 видно, что начальный рост пленки (время напыления до 4 с) приводит к увеличению максимальной разности высот R_q , тогда как средняя шероховатость R_q монотонно убывает практически до толщины, соответствующей времени напыления 19 с. Однако как шероховатость, так и разность высот показали рост неоднородностей на толщинах, соответствующих времени напыления порядка 26 с, которые выбиваются из закономерного монотонного «сглаживания» рельефа при увеличении толщин пленок. Полученная аномалия на времени напыления, равном 26 с, коррелирует с проведенными ранее исследованиями [5] по поглощению СВЧ-излучения тонкими металлическими пленками.

Механизм роста пленок на подложке

На рис. 4 представлена динамика формирования пленки на поверхности подложки. Из предположения, что рост пленки алюминия на стеклянной подложке происходит по механизму Фольмера-Вебера [7], можно допу-

стить, что при магнетронном осаждении алюминия на данные подложки природа образования сплошного покрытия соответствует механизму роста островкового типа.

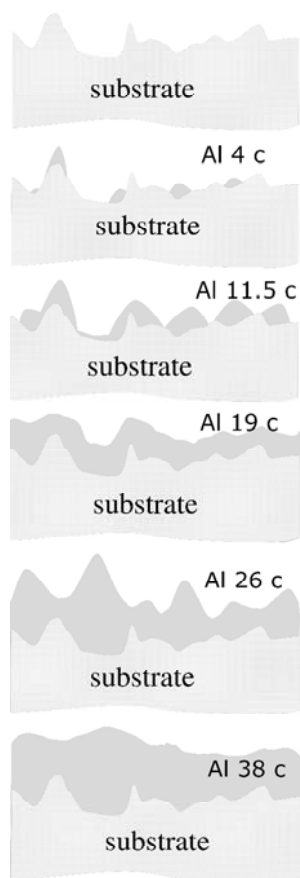


Рис. 4. Механизм роста пленок на подложке.

Первичные зародыши образуются непосредственно на поверхности подложки, предположительно, на участках в виде ступенек, углублений, а также дефектов атомарной стехиометрии решетки подложки, где атомы осаждаемого вещества имеют более сильную связь с атомами подложки. Как следствие, подобные несовершенства могут существенно повысить скорость зародышеобразования [8].

Поэтому в нашем случае, т. е. при наличии сложной, разветвлённой геометрии подстилающей поверхности (рис. 4, слой Substrate), которая обусловлена различными несовершенствами техпроцесса, высота барьера зародышеобразования H_0 , оцениваемая по формуле из работы [9]:

$$H_0 = H + \ln\left(n_0 / \sum_{k=1}^m n_{1k}\right),$$

уменьшается и, как следствие, увеличивается скорость роста I [9]:

$$I = n_0 \left(\sum_{k=1}^m d_k \right) \exp(-H_0),$$

где d_k – коэффициенты диффузии каждого из m компонент в пространстве размеров, H – высота активационного барьера, n_{1k} – k -ое распределение атомов в n_0 узлах решетки, n_1 – распределение атомов в n_0 узлах решетки. Именно это и обуславливает первичный рост отдельных зародышей, которые усложняют рельеф поверхности (рис. 4, время 4 с).

При дальнейшем поступлении осаждаемого материала зародыши островковой структуры растут, превращаясь в большие островки конденсированной фазы [8]. Предполагается, что скорость увеличения диаметра островка выше, чем его высота. Благодаря этому, островковые структуры начинают объединяться (рис. 3, время 11,5 с), образуя различного вида каналы и пустоты. Затем, сливаясь, эти островки, после заполнения каналов между ними, образуют сплошную пленку. После образования непрерывного слоя шероховатость поверхности (рис. 4, время 19 с) уменьшается.

Сравнительно ровная поверхность пленки при более сильной шероховатости подложки предполагает разную толщину слоя на различных участках: на участках с пиками высоты подложки толщина материала меньше, чем на участках у подножья и равнинах. Учитывая атомарное согласование решеток пленки и подложки, участки над сильной шероховатостью поверхности имеют более сильное рассогласование решеток, в отличие от более ровных участков, где решетка материала уже стабилизировалась.

Изменение параметра решётки алюминия ($\sim 4 \text{ \AA}$) приводит к сильному увеличению энергии поверхности раздела «адсорбата–промежуточного слоя», обеспечивающего выполнение критерия островкового режима [8, 9]:

$$\sigma_s < \sigma_d + \sigma_{s-d} - const \times k_B T \ln(\xi + 1), \quad (1)$$

где σ_s – свободная энергия единицы поверхности подложки, σ_d – свободная энергия единицы поверхности осажденного вещества (адсорбата), σ_{s-d} – свободная энергия единицы поверхности раздела «подложка–адсорбат» и ξ – отношение поверхностной концентрации

к равновесной концентрации атомов осаждаемого материала.

Выполнение условия (1) приводит к появлению участков, более выгодных для осаждения диффундирующих атомов, и, как следствие, повторному росту островковой структуры (см. рис. 4, Al 26 с). Данное предположение подтверждается ростом динамики изменения шероховатости поверхности на толщине, соответствующей времени напыления 26 с (рис. 3).

При дальнейшем осаждении материала вторичные островки расширяются, сливаются и после заполнения каналов между ними образуют сплошную пленку (рис. 3, время 38 с) с минимальной шероховатостью, что наблюдается на графиках рис. 3, соответствующей времени напыления 38 с.

Заключение

В работе исследован механизм формирования проводящих алюминиевых плёнок на поверхности стеклянных подложек, обладающих сильным перепадом высот и сложной геометрией. На основе полученных данных, можно предположить, что пленка формируется следующим образом: с увеличением толщины, атомные слои огибают шероховатости поверхности подложки, делая поверхность пленки все более гладкой и уменьшая перепады высот, причём с образованием смачивающего слоя для дальнейшего образования островковых структур (предположительно, с 26 секунды напыления), с последующим их сращиванием между собой и уменьшением шероховатости. Приведенное выше предположение объясняется динамикой изменения шерохова-

тости поверхности, в частности, при времени напыления алюминиевой пленки, равном 26 с, шероховатость резко возрастает, но уже к 38-й с данный показатель существенно ниже этого же показателя на 19-й с напыления.

АСМ-исследования поверхности образцов показали, что пленка с толщиной, соответствующей времени напыления 11,5 с, имеет более значительную шероховатость поверхности, чем более толстые пленки, но этот показатель меньше, чем для пленки, соответствующей времени 4 с напыления, что, видимо, связано с особенностями АСМ-метода и механизмом зародышеобразования пленки.

ЛИТЕРАТУРА

1. Imec and Cadence Tape Out Industry's First 3nm Test Chip – LEUVEN. Belgium and SAN JOSE. Calif. 28 Feb 2018. URL: https://www.cadence.com/content/cadence-www/global/en_US/home/company/newsroom/press-releases/pr/2018/imec-and-cadence-tape-out-industry-s-first-3nm-test-chip.html
2. Ahmad N., Stokes J. // Nano Energy. 2012. Vol. 1. No. 6.
3. Sucheng Li. Broadband. Physical Review. 2015. P. 91.
4. Claassen John H. // Transactions on Applied Superconductivity. 2014. Vol. 3 No. 25 P. 3.
5. Арсеничев С. П., Григорьев Е. В., Зуев С. А., Старостенко В. В., Таран Е. П., Фитаев И. Ш. // Электромагнитные волны и электронные системы. 2017. Т. 22. № 2. С. 48.
6. Liu J., Nemchuk N. I., Ast D. G., Couillard J. G. // Journal of Non-Crystalline Solids. 2004. Vol. 342. P. 110.
7. Prater C. B., Maivald P. G., Kjoller K. J., Heaton M. G. // Veeco Application note. 2004. P. 3.
8. Кукушкин С. А., Осипов А. В. // Успехи физических наук. 1998. Т. 168. № 10. С. 1083.
9. Хурс Д., Паунд Г. // Metallurgy. 1966. P. 184.

PACS: 68.37.-d, 68.47.De

Forming surface dynamics of conductive aluminum films deposited on amorphous substrates

V. V. Starostenko, A. S. Mazinov, I. Sh. Fitaev, E. P. Taran, and V. B. Orlenson

V. I. Vernadsky Crimean Federal University
4 Prospekt Vernadskogo, Simferopol, Republic of Crimea, 295007, Russia
E-mail: mazinovas@cfuv.ru

Received May 23, 2019

Consideration is given to the growth dynamics of thin aluminum films on a glass substrate with inhomogeneous surface of the order of 15 nm peak range of thickness and surface roughness of the order of 2 nm cavities. Aluminum films deposited within industrial vacuum were used as the object of this research. The nature of the aluminum films relief changes is shown with the rise of the metallic bulk mass. The surface morphology analysis of the substrate, which is used as a glass designed for high-quality X-ray photographs, is provided.

Keywords: surface morphology, atomic force microscopy, conductive thin films, surface roughness.

REFERENCES

1. *Imec and Cadence Tape Out Industry's First 3nm Test Chip* (LEUVEN. Belgium and SAN JOSE. Calif. 28 Feb 2018.) URL: https://www.cadence.com/content/cadence-www/global/en_US/home/company/newsroom/press-releases/pr/2018/imec-and-cadence-tape-out-industry-s-first-3nm-test-chip.html
2. N. Ahmad and J. Stokes, *Nano Energy* **1** (6), (2012).
3. Li. Sucheng, *Broadband. Physical Review* **91** (2015).
4. John H. Claassen, *Transactions on Applied Superconductivity* **3**, 25 (2014).
5. S. P. Arsenichev, Y. V. Grigoriev, S. A. Zuev, V. V. Starostenko, Y. P. Taran, and I. Sh. Fitaev, *Electromagnitnye Volny i Electronnye Systemy* **22**, 2 (2017).
6. J. Liu, N. I. Nemchuk, D. G. Ast, and J. G. Couillard, *Journal of Non-Crystalline Solids* **342**, 110 (2004).
7. C. B. Prater, P. G. Maivald, K. J. Kjoller, and M. G. Heaton, *Veeco Application note*, 3 (2004).
8. S. A. Kukushkin and A. V. Osipov, *Physics-Uspekhi* **168**, 10 (1998).
9. D. Hirs and G. Pound, *Metallurgy*, 184 (1966).