

УДК 539.23; 534-8; 53.091
PACS 68.55.-a; 68.37.-d

Особенности формирования тонких пленок алюминия под воздействием ультразвуковых колебаний подложки

А. Е. Уразбеков*, Ю. В. Сахаров†

Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники, Томск, Россия

* artur.urazbekov@mail.ru

† iurii.v.sakharov@tusur.ru

С применением методов атомно-силовой и растровой электронной микроскопии исследованы тонкие пленки алюминия, выращенные на ситалловых подложках. Впервые показано, что ультразвуковые колебания подложки во время осаждения стимулируют формирование островков на поверхности пленки. Однако на среднюю высоту и латеральные размеры островков ультразвуковые возмущения подложки не оказывают существенного влияния.

Ключевые слова: островковые тонкие пленки; ультразвуковые колебания; самоорганизация; алюминий

Поступила в редакцию 27.03.2023; после рецензии 06.07.2023; принята к опубликованию 10.07.2023

Features of the formation of aluminum thin films under the influence of ultrasonic vibrations of the substrate

A. E. Urazbekov*, Yu. V. Sakharov†

Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics, Tomsk, Russia

* artur.urazbekov@mail.ru

† iurii.v.sakharov@tusur.ru

Atomic force and scanning electron microscopy methods were used to study aluminum thin films grown on sitallic substrates. This study is the first to show that ultrasonic vibrations of the substrate during deposition stimulate the formation of islands on the film surface. However, the average height and lateral dimensions of the islands are not significantly affected by ultrasonic perturbations of the substrate.

Keywords: island thin films; ultrasonic vibrations; self-organization; aluminum

Received 27 March 2023; revised 06 July 2023; accepted 10 July 2023

doi: 10.17072/1994-3598-2023-3-05-08

1. Введение

Тонкие пленки алюминия находят широкое применение в микроэлектронике благодаря своим свойствам, таким как низкое удельное сопротивление, высокая отражательная способность, стойкость к окислению и коррозии, высокая адгезионная прочность. Ясно, что на свойства пленок, толщина которых соизмерима с размерами остров-

ков, будут оказывать влияния островковые структурные неоднородности (островки). Этим обстоятельством определяется интерес к изучению островковых пленок как с фундаментальной, так и с прикладной точек зрения. Прогресс, наблюдаемый в создании наноструктур пониженной размерности, связан с использованием эффектов самоорганизации, т. е. создание таких условий, когда система сама стремится к созданию наноструктур

спонтанным образом. Для создания определенных типов наноструктур путем самоорганизации используются различные процессы. В настоящей работе к такому процессу относятся ультразвуковые колебания подложки. Известно достаточное количество теоретических и экспериментальных исследований, иллюстрирующих влияние акустических колебаний на растущие тонкие пленки [1–3]. Однако существует лишь одна работа [4], в которой сообщалось о влиянии ультразвуковых колебаний подложки на рост тонких пленок золота. Но методы исследования микроструктуры твердых тел того времени оставляли открытым вопрос о поверхности пленок и не давали возможности получить изображения торцевого скола пленки. Также стоит отметить исследование [5], в котором было продемонстрировано возможность влиять на эволюцию размеров и форм островков путем варьирования температуры подложки.

2. Методика измерений и результаты

Исследуемые пленки алюминия получены путем испарения в вакууме на установке УВН-2М при давлении 5×10^{-5} мм рт.ст. Две ситалловые подложки ставились рядом. К одной из них с помощью тонкого слоя термостойкого клея был присоединен пьезоэлемент с резонансной модой колебаний 1.7 МГц. Амплитуда колебания подложки составляла ~ 0.5 мкм. Для осаждения алюминия использовался проволочный испаритель из вольфрама, на который подавался ток 30 А. Время

напыления составляло 5 с. Непродолжительное время осаждения пленки позволяло пренебречь изменением температуры подложки вследствие нагрева пьезоэлемента. Далее полученные образцы были исследованы методами растровой электронной микроскопии (РЭМ) с использованием TESCAN MIRA 3LMU.

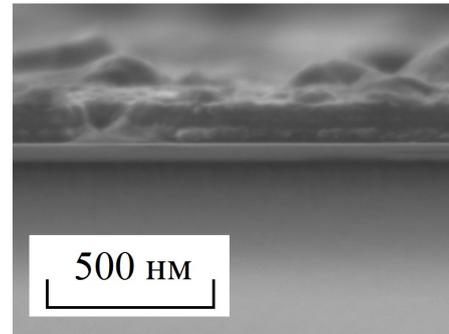


Рис. 1. Микрофотография скола пленки алюминия, выращенной на вибрирующей ситалловой подложке с частотой 1.7 МГц

На рис. 1 представлена микрофотография торцевого скола пленки алюминия, осажденной на вибрирующей подложке. Можно заметить ясно выраженную слоистую морфологию, что свидетельствует о том, что в пленке возникают механические напряжения. Наличие островков на поверхности в сочетании со слоистой морфологией может говорить о росте по механизму Странского–Крастанова.

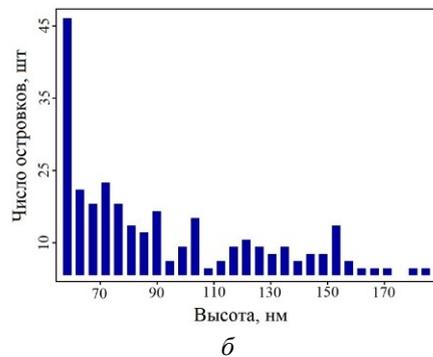
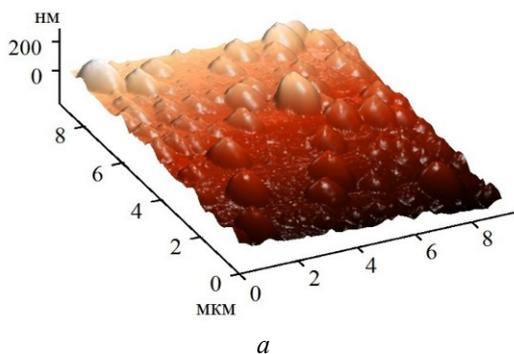


Рис. 2. АСМ-изображения поверхности пленок, выращенных на ситалловых подложках, колеблющихся с частотой 1.7 МГц (а) и распределение островков по высоте (б)

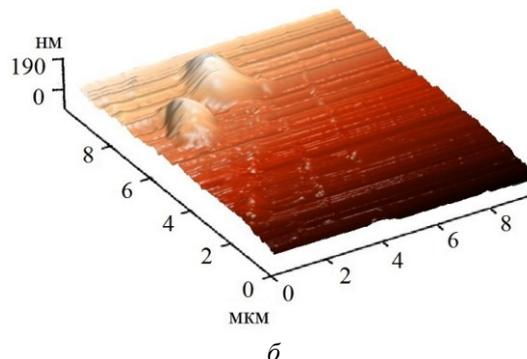
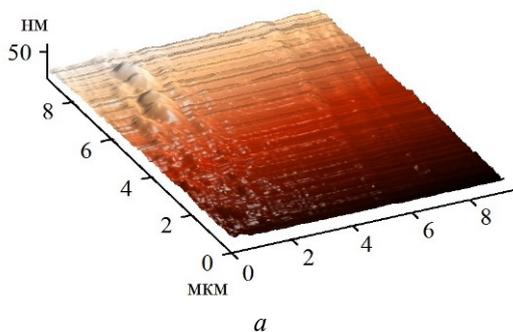


Рис. 3. АСМ-изображения поверхности пленок, выращенных на ситалловых подложках без ультразвукового возмущения подложки с двух отдаленных участков

Морфологические характеристики поверхности пленок алюминия

Частота колебаний подложки, МГц	Средняя высота островков, нм	Максимальная высота островков, нм	Средняя шероховатость, нм	Среднеквадратичное отклонение, нм
1.7	38	190	26	35
0	38	190	8	15

Измерение рельефа поверхности проводилось методом атомно-силовой микроскопии (АСМ) при помощи микроскопа Solver HV. На рис. 2 продемонстрированы АСМ-изображения поверхности пленки алюминия, осажденной на вибрирующей подложке и распределение островков по высоте. Видно, что ультразвуковые колебания подложки усиливают образование островков во время роста, создавая массив регулярно расположенных на поверхности неоднородностей разного размера. При этом квазипериодический поверхностный рельеф имел пространственный период ~ 1.8 мкм, что на несколько порядков меньше длины волны ультразвуковых колебаний в данной среде. Из распределения островков по высоте (рис. 2, б) видно, что для этого режима осаждения характерно формирование островков с широким диапазоном размеров. Причем доля малых островков является преобладающей. Вероятными также являются высоты $\sim 75, 90, 105, 120, 155$ нм. Средний латеральный размер островков составлял примерно 1 мкм. На рис. 3 представлено АСМ-изображение исходной поверхности пленки алюминия (без ультразвукового воздействия) для двух различных участков. Видно, что для данных пленок характерно формирование островков преимущественно малых размеров. На пленке также присутствуют островки высотой до 190 нм с поверхностной плотностью $\sim 6 \cdot 10^5$ см $^{-2}$. Средний латеральный размер островков составлял примерно 1 мкм. Основные морфологические характеристики пленок представлены в таблице, где также стоит обратить внимание на увеличение средней шероховатости пленки вследствие ультразвуковых колебаний подложки во время осаждения более чем в три раза.

3. Заключение

В настоящем исследовании представлены результаты получения островковых пленок алюминия на ситалловых подложках, а также краткое описание морфологических и структурных свойств полученных пленок. Следует подчеркнуть, что предложенный метод является весьма несовершенным и имеет ряд недостатков. Во-первых, пьезокерамический преобразователь, который передает колебания подложке, имеет ограниченное количество мод, не позволяя построить непрерывную зависимость каких-либо характеристик пленки от частоты колебаний подложки. Во-вторых, существует трудность в передаче колебаний от пьезоэлемента к подложке в виду малой амплитуды

ультразвуковых возмущений и быстрой деградации прослойки между подложкой и пьезоэлементом. Однако наиболее важно, что экспериментально была показана возможность формирования островковых пленок под воздействием ультразвуковых колебаний подложки во время роста.

Исследование проведено при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации в рамках программы «Приоритет 2030». Работа выполнена в рамках соглашения №075-03-2020-237/1 от 05 марта 2020г.

Список литературы

- Hristova-Vasileva T., Bineva I., Dinescu A., et al. "Cymatics" of selenium and tellurium films deposited in vacuum on vibrating substrates // *Surface and Coatings Technology*. 2016. V. 307. P. 542–546.
- Taillan C., Combe N., Morillo J. Nanoscale self-organization using standing surface acoustic waves // *Physical Review Letters*. 2011. V. 106, 076102.
- Taillan C., Combe N., Morillo J. Chladni figures at the nanoscale // *European Physical Journal B*. 2015. N. 88. P. 317.
- Chopra K. L., Randlett M. R. Effect of ultrasonic vibrations of the substrate on the growth of thin metal films // *Applied Physics Letters*. 1967. V. 11. N. 6. P. 202-203.
- Voigtländer B. Fundamental processes in Si/Si and Ge/Si studied by scanning tunneling microscopy during growth // *Surface Science Reports*. 2001. V. 43. N. 5/3. P. 127-254.

References

- Hristova-Vasileva T., Bineva I., Dinescu A., et al. "Cymatics" of selenium and tellurium films deposited in vacuum on vibrating substrates. *Surface and Coatings Technology*, 2016, vol. 307. pp. 542–546.
- Taillan C., Combe N., Morillo J. Nanoscale self-organization using standing surface acoustic waves. *Physical Review Letters*, 2011, vol.106, 076102.
- Taillan C., Combe N., Morillo J. Chladni figures at the nanoscale. *European Physical Journal B*, 2015, vol. 88, pp. 317.
- Chopra K. L., Randlett M. R. Effect of ultrasonic vibrations of the substrate on the growth of thin metal films. *Applied Physics Letters*, 1967, vol. 11, no. 6, pp. 202-203.

5. Voigtländer B. Fundamental processes in Si/Si and Ge/Si studied by scanning tunneling microscopy during growth. *Surface Science Reports*, 2001, vol. 43, no. 5/3, pp. 127–254

Просьба ссылаться на эту статью в русскоязычных источниках следующим образом:

Уразбеков А. Е., Сахаров Ю. В. Особенности формирования тонких пленок алюминия под воздействием ультразвуковых колебаний подложки // Вестник Пермского университета. Физика. 2023. № 3. С. 05–08. doi: 10.17072/1994-3598-2023-3-05-08

Please cite this article in English as:

Urazbekov A. E., Sakharov Yu. V. Features of the formation of aluminum thin films under the influence of ultrasonic vibrations of the substrate. *Bulletin of Perm University. Physics*, 2023, no. 3, pp. 05–08. doi: 10.17072/1994-3598-2023-3-05-08

Сведения об авторах

1. Уразбеков Артур Еркынович, мл. науч. сотр. Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники, пр. Ленина 40, Томск, 634050
2. Сахаров Юрий Владимирович, д.т.н., профессор, Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники, пр. Ленина 40, Томск, 634050

Author information

1. Arthur E. Urazbekov, Junior Researcher, Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics; 40, prospekt Lenina, Tomsk, 634050, Russia.
2. Yury V. Sakharov, Doctor of Engineering Sciences, Professor, Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics; 40, prospekt Lenina, Tomsk, 634050, Russia.