

ФОРМИРОВАНИЕ МОНОКРИСТАЛЛИЧЕСКИХ ПЛЕНОК АЛЮМИНИЯ НА БАЗЕ SCULL-ТЕХНОЛОГИИ

| | |
|---------------------------------|-------------------------------|
| М.В. Андрощук ¹ | androschukmv@student.bmstu.ru |
| Д.О. Москалев ^{1,2} | moskalevdm@bmstu.ru |
| Н.Д. Коршаков ^{1,2} | korshakov@bmstu.ru |
| Т.Г. Константинова ¹ | tgkonst@bmstu.ru |
| О.С. Сорокина ^{1,2} | soros@bmstu.ru |
| Д.А. Фокин ¹ | fokinda@bmstu.ru |
| А.С. Бабурин ^{1,2} | baburin@bmstu.ru |
| Ю.В. Панфилов ¹ | panfilov@bmstu.ru |
| И.А. Рыжиков ^{1,3} | ilyaryzhikov@rambler.ru |
| И.А. Родионов ^{1,2} | irodionov@bmstu.ru |

¹ МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Российская Федерация

² ФГУП «ВНИИА», Москва, Российская Федерация

³ ИТПЭ РАН, Москва, Российская Федерация

Аннотация

Представлены результаты комплексного исследования островковой стадии роста тонких алюминиевых пленок, необходимой для формирования затравочного слоя и основанной на нем сплошной монокристаллической тонкой пленки на базе SCULL-технологии. Проведено исследование влияния параметров процесса электронно-лучевого испарения — температуры подложки в процессе роста тонкой пленки 200...500 °С, толщины затравочного слоя 3...5 нм — на латеральный размер островков. Экспериментальные образцы исследованы методами сканирующей электронной микроскопии, дифракции обратно-отраженных электронов, дифракции рентгеновских лучей и атомно-силовой микроскопии. В результате исследований получена зависимость изменения характера роста затравочного слоя алюминиевой тонкой пленки от параметров процесса осаждения. Разработанная технология формирования затравочного слоя на согласованной с алюминием по постоянной решетке кремниевой подложке Si(111) позволила получить на его основе сплош-

Ключевые слова

Алюминиевая тонкая пленка, электронно-лучевое испарение, SCULL-технология, монокристаллическая пленка

ную пленку алюминия с монокристаллической структурой, толщина которой составляет 35 нм. Поступила 04.12.2023
Среднеквадратичная шероховатость пленки менее 0,4 нм, FWHM = 0,453° Принята 26.02.2024
© Автор(ы), 2024

Экспериментальные образцы и технология разработаны в технологическом центре МГТУ им. Н.Э. Баумана (НОЦ «Функциональные микро/наносистемы», ID 74300). Работа выполнена с использованием атомно-силового микроскопа Dimension Icon, входящего в состав уникальной научной установки «Авогадро» (<http://avo.ibmc.msk.ru/>)

Введение. Исследования технологии роста тонких монокристаллических пленок алюминия на кремниевых подложках продолжают более 50 лет [1]. Металлические монокристаллические пленки являются ключевым элементом для изготовления плазмонных и нанофотонных схем [2], обеспечения воспроизводимости оптических антенн высокой четкости [3], улучшения рабочей температуры и производительности нанолазеров [4], изготовления микроволновых резонаторов, которые используют в сверхпроводниковых квантовых устройствах, однофотонных детекторах, квантовой памяти [5–11].

Основными методами осаждения монокристаллических пленок алюминия являются осаждение с ионным ассистированием [12–14], магнетронное распыление [15, 16], термическое испарение [17–20], электронно-лучевое испарение [21, 22] и молекулярно-лучевая эпитаксия [23–26]. В настоящее время метод электронно-лучевого испарения наиболее приоритетный ввиду широкого диапазона интенсивностей создаваемых потоков, низкой энергии атомов, отсутствия ионной составляющей, низкого рабочего давления и экономической целесообразности [27].

В работе описана SCULL-технология (Single-Crystalline Continuous Ultra-Smooth Low-Loss Low-Cost), оптимизированная для процесса формирования алюминиевых тонких пленок. Технология предполагает осаждение сплошной пленки в два этапа: на первом этапе происходит формирование затравочного слоя двумерных островков, на втором — доосаждение до сплошной пленки в режиме двумерного роста в едином вакуумном цикле [28]. На первом этапе рост пленки происходит по модели Вольмара — Вебера, на втором — по модели Франка — Ван-дер-Мерве [29], поскольку энергия системы пленка–подложка меняется, что приводит к изменению характера роста пленки. Рассмотрены процессы роста тонких пленок алюминия и определены основные технологические зависимости для получения сплошных монокристаллических пленок толщиной около 35 нм.

Описание экспериментов и методов. Во всех экспериментах пленки сформированы на установке электронно-лучевого испарения с базовым вакуумом 10^{-9} мбар. В качестве испаряемого металла использован алюминий чистотой 99,999 %. Скорость испарения составляла 0,1 нм/с. Толщина затравочного слоя в экспериментах варьировалась в диапазоне значений 3...5 нм и контролировалась с использованием кварцевого резонатора непосредственно в процессе осаждения. В процессе экспериментального исследования все образцы подвергали предварительной термической обработке перед процессом осаждения в едином вакуумном цикле. Температура подложки в процессе осаждения варьировалась в диапазоне значений 200...500 °С. Для анализа экспериментальных образцов использованы различные метрологические методы контроля качества поверхности тонких пленок.

Метод сканирующей электронной микроскопии. Для проверки качества и однородности сформированных тонких пленок проведены исследования на сканирующем электронном микроскопе (СЭМ). Все СЭМ-изображения получены с использованием встроенного в объектив детектора при ускоряющем напряжении 5 кВ и рабочем расстоянии от образца до детектора 2...4 мм. Для полного анализа образцов использованы увеличения 3000, 7000, 15 000, 50 000, 100 000. Для количественной оценки СЭМ-изображений применено специальное программное обеспечение обработки изображений.

Метод дифракции обратно-отраженных электронов. Пленки алюминия проанализированы с использованием сканирующего электронного микроскопа, оснащенного детектором обратно-отраженных электронов для оценки ориентации элементарных ячеек сформированной пленки (EBSD). EBSD-изображения получены при следующих режимах съемки: угол наклона 70°, ускоряющее напряжение 15 кэВ, размеры сканирования $2,5 \times 2,5$ мкм².

Метод дифракции рентгеновских лучей. Метод дифракции рентгеновских лучей (XRD) использован для исследования ориентации кристаллитов тонкой пленки. Исследовать ориентацию кристаллитов относительно плоскости подложки позволило 2θ -сканирование, ориентацию кристаллитов относительно нормали к плоскости подложки — ω -сканирование. Для оценки меры упорядоченности кристаллитов относительно нормали к плоскости подложки использован параметр *FWHM* — ширина пика на его полувысоте.

Метод атомно-силовой микроскопии. При использовании метода атомно-силовой микроскопии (АСМ) применен зонд с номинальным ра-

диусом острия 2 нм. Площадь сканирования $2,8 \times 2,8$, 25×25 мкм². Использован режим силового сканирования образца. В процессе сканирования петлей обратной связи поддерживалось постоянное значение силы взаимодействия зонда с поверхностью образца. Таким образом минимизирована локальная деформация образца. Деформация образца не превышала 0,2 нм во всех исследованных областях. Такие значения деформации не приводят к изменению морфологии пленки, что подтверждается измеренными значениями шероховатости поверхности, которые не изменяются после повторного сканирования.

Результаты и обсуждение. Экспериментально получены зависимости изменения характера роста пленки от параметров осаждения (рис. 1, 2). Толщина слоя 3...5 нм (СЭМ-изображения на рис. 1, а). Результаты экспериментальных исследований зависимости средней площади островков и числа островков малой площади (до 1000 нм²) от толщины затравочного слоя приведены на рис. 1, б. Все экспериментальные исследования

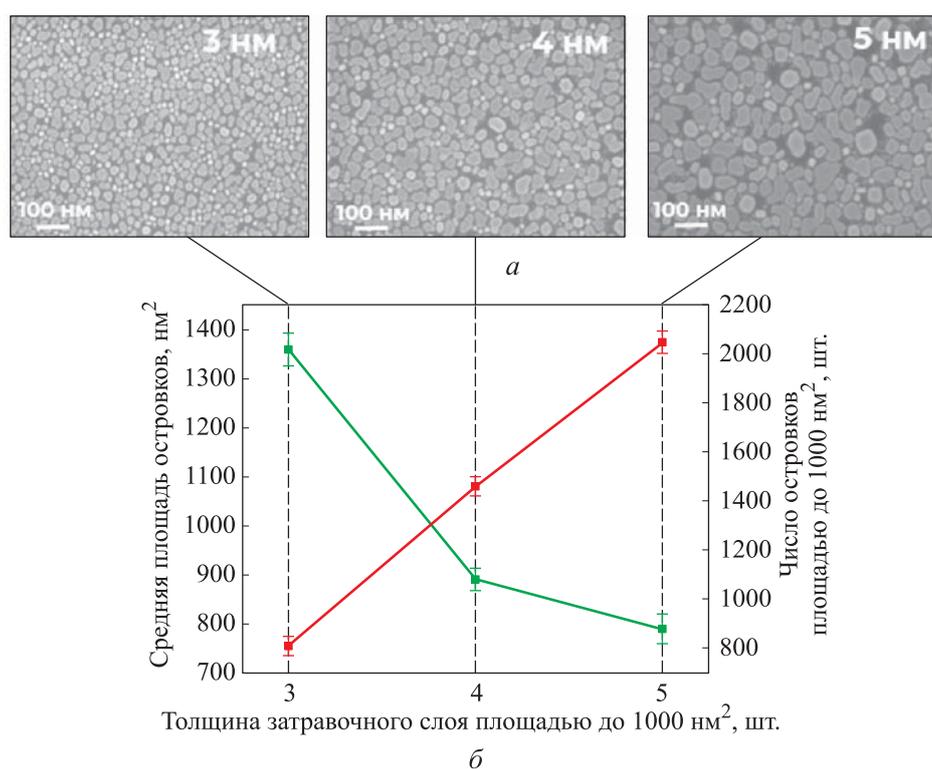


Рис. 1. СЭМ-изображения затравочного слоя различной толщины (а) и зависимость средней площади островков (—) и числа островков малой площади до 1000 нм² (—) от толщины затравочного слоя (б)

выполнены при температуре подложки в процессе осаждения 300 °С. В результате экспериментов установлено, что при увеличении затравочного слоя размер островков возрастает от 800 до 1400 нм². Это связано с увеличением количества испаряемого материала, осаждающегося на поверхность подложки. При дальнейшем осаждении материала островки малой площади образуют островки большего размера вследствие коалесценции. Зависимость средней площади и числа островков малой площади от толщины затравочного слоя (см. рис. 1, б) построена с использованием специального программного обеспечения графической обработки СЭМ-изображений.

Зависимость средней площади островков от температуры подложки, которая варьировалась в диапазоне значений 200...500 °С, при различных значениях толщины затравочного слоя приведена на рис. 2, а. В результате экспериментального исследования установлено, что независимо от темпе-

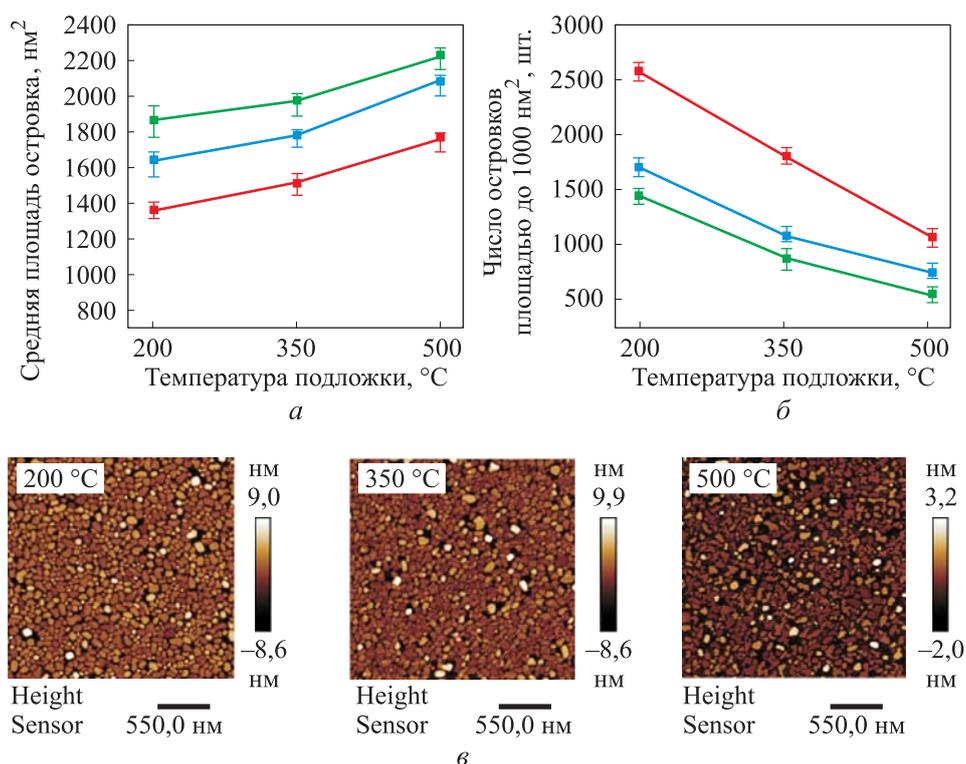


Рис. 2. Зависимости средней площади островков (а) и числа островков малой площади до 1000 нм² (б) от температуры подложки при значениях толщины затравочного слоя 3 (—), 4 (—) и 5 нм (—), АСМ-изображения затравочного слоя при различных значениях температуры подложки в процессе осаждения (в)

ратуры подложки происходит увеличение средней площади островков при возрастании затравочного слоя с 3 до 5 нм. При повышении температуры подложки наблюдается равномерное увеличение средней площади островков для различных значений толщины затравочного слоя. Такой эффект связан с увеличением диффузионного пробега адатома, что обуславливает уменьшение числа зародышей и увеличение размера островков [30]. Зависимость числа островков малой площади (до 1000 нм^2) от температуры подложки при различных значениях толщины затравочного слоя показана на рис. 2, б. В процессе исследования наблюдается уменьшение числа островков малой площади с возрастанием толщины затравочного слоя, что обусловлено увеличением адатомов на поверхности подложки и последующей коалесценцией металлических островков. При повышении температуры подложки число островков площади (до 1000 нм^2) снижается независимо от толщины затравочного слоя. Эта зависимость подтверждается кинетической теорией роста тонких пленок [30]. АСМ-изображения затравочного слоя при различных значениях температуры подложки в процессе осаждения представлены на рис. 2, в.

Согласно результатам проведенных исследований, при температуре подложки $500 \text{ }^\circ\text{C}$ средняя площадь островков наибольшая. На основании этого проведено доосаждение материала для формирования сплошной алюминиевой пленки толщиной 35 нм на островковый слой, сформированный при температуре подложки $500 \text{ }^\circ\text{C}$. Результаты комплексного метрологического анализа сформированной пленки приведены на рис. 3. СЭМ-изображение, на которое наложено изображение цветов Эйлера, показано на рис. 3, а. На основании результатов проведенного EBSD-анализа установлено, что структура полученной алюминиевой пленки соответствует одной фазе и одной ориентации элементарных ячеек. Обратные полюсные фигуры демонстрируют высокую плотность ориентации элементарных ячеек вдоль основных направлений. Результаты XRD-анализа показаны на рис. 3, б, в. 2θ -дифрактограмма (см. рис. 3, б) демонстрирует пик Al(111) и пик подложки Si(111). $\text{FWHM} = 0,453^\circ$ (ω -дифрактограмма, см. рис. 3, в). По данным АСМ (рис. 3, г) среднеквадратичная шероховатость RMS составила 0,34 нм. Совокупность измеренных параметров, характеризующих сформированную в рамках исследования тонкую алюминиевую пленку, свидетельствует о ее монокристаллической структуре.

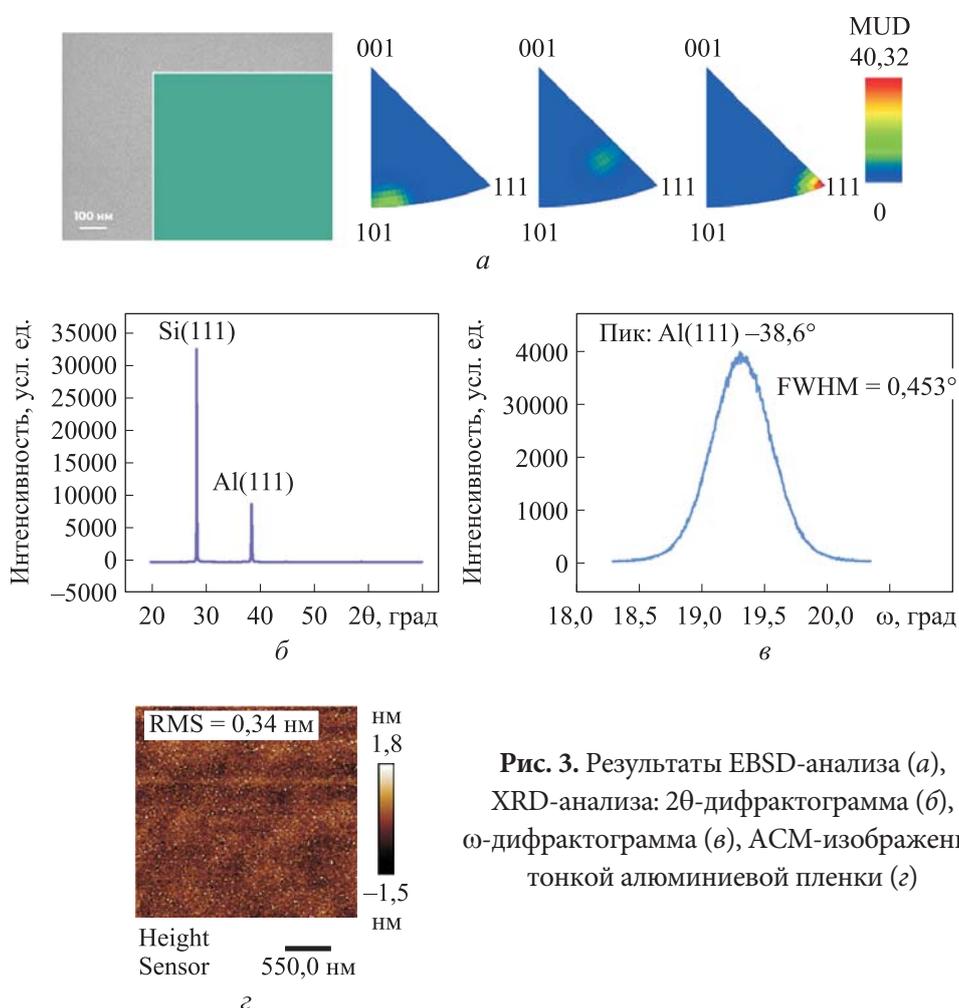


Рис. 3. Результаты EBSD-анализа (а), XRD-анализа: 2θ-диффрактограмма (б), ω-диффрактограмма (в), АСМ-изображение тонкой алюминиевой пленки (г)

Заключение. В результате экспериментальных исследований получены зависимости изменения характера роста затравочного слоя тонкой алюминиевой пленки от его толщины. Установлено, что при увеличении толщины затравочного слоя возрастает размер островков. Определены зависимости характера роста затравочного слоя от толщины и температуры подложки. При повышении температуры подложки уменьшается число островков малой площади (до 1000 nm^2) и увеличивается средний размер островков.

Методом электронно-лучевого испарения на базе SCULL-технологии сформирована тонкая монокристаллическая алюминиевая пленка толщиной 35 нм. Среднеквадратичная шероховатость сформированной пленки, измеренная на атомно-силовом микроскопе, равна 0,34 нм. По результатам XRD-анализа $\text{FWHM} = 0,453^\circ$.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] McSkimming B.M., Alexander A., Samuels M.H., et al. Metamorphic growth of relaxed single crystalline aluminum on silicon (111). *J. Vac. Sci. Technol. A*, 2017, vol. 35, iss. 2, art. 02401. DOI: <https://doi.org/10.1116/1.4971200>
- [2] Vesseur E.J.R., de Waele R., Lezec H.J., et al. Surface plasmon polariton modes in a single-crystal Au nanoresonator fabricated using focused-ion-beam milling. *Appl. Phys. Lett.*, 2008, vol. 92, iss. 8, art. 083110. DOI: <https://doi.org/10.1063/1.2885344>
- [3] Huang J.-S., Callegari V., Geisler P., et al. Atomically flat single-crystalline gold nanostructures for plasmonic nanocircuitry. *Nat. Commun.*, 2010, vol. 1, art. 150. DOI: <https://doi.org/10.1038/ncomms1143>
- [4] Lu Y.-J., Kim J., Chen H.-Y., et al. Plasmonic nanolaser using epitaxially grown silver film. *Science*, 2012, vol. 337, no. 6093, pp. 450–453. DOI: <https://doi.org/10.1126/science.1223504>
- [5] Koch J., Terri M.Y., Gambetta J., et al. Charge-insensitive qubit design derived from the Cooper pair box. *Phys. Rev. A*, 2007, vol. 76, iss. 4, art. 042319. DOI: <https://doi.org/10.1103/PhysRevA.76.042319>
- [6] Barends R., Kelly J., Megrant A., et al. Superconducting quantum circuits at the surface code threshold for fault tolerance. *Nature*, 2014, vol. 508, no. 7497, pp. 500–503. DOI: <https://doi.org/10.1038/nature13171>
- [7] Kim Z., Suri B., Zaretsky V., et al. Decoupling a Cooper-pair box to enhance the lifetime to 0.2 ms. *Phys. Rev. Lett.*, 2011, vol. 106, iss. 12, art. 120501. DOI: <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.106.120501>
- [8] Gol'tsman G.N., Okunev O., Chulkova G., et al. Picosecond superconducting single-photon optical detector. *Appl. Phys. Lett.*, 2001, vol. 79, iss. 6, pp. 705–707. DOI: <https://doi.org/10.1063/1.1388868>
- [9] Hofheinz M., Wang H., Ansmann M., et al. Synthesizing arbitrary quantum states in a superconducting resonator. *Nature*, 2009, vol. 459, no. 7246, pp. 546–549. DOI: <https://doi.org/10.1038/nature08005>
- [10] Wang H., Hofheinz M., Wenner J., et al. Improving the coherence time of superconducting coplanar resonators. *Appl. Phys. Lett.*, 2009, vol. 95, iss. 23, art. 233508. DOI: <https://doi.org/10.1063/1.3273372>
- [11] Mariantoni M., Wang H., Yamamoto T., et al. Implementing the quantum von Neumann architecture with superconducting circuits. *Science*, 2011, vol. 334, no. 6052, pp. 61–65. DOI: <https://doi.org/10.1126/science.1208517>
- [12] Choi C.-H., Harper R.A., Yapsir A.S., et al. Epitaxial growth of Al(111)/Si(111) films using partially ionized beam deposition. *Appl. Phys. Lett.*, 1987, vol. 51, iss. 24, pp. 1992–1994. DOI: <https://doi.org/10.1063/1.98321>
- [13] Choi C.-H., Ramanarayanan R., Mei S.N., et al. Control of Al orientation on Si(100) substrate using a partially ionized beam. *MRS Online Proceedings Library*, 1987, vol. 93, pp. 267–271. DOI: <https://doi.org/10.1557/PROC-93-267>

- [14] Yamada I., Takagi T. Metallization by ionized cluster beam deposition. *IEEE Trans. Electron. Devices*, 1987, vol. 34, iss. 5, pp. 1018–1025.
DOI: <https://doi.org/10.1109/T-ED.1987.23038>
- [15] Nakajima Y., Kusuyama K., Yamaguchi H., et al. Growth of single-crystal aluminum films on silicon substrates by DC magnetron sputtering. *Jpn. J. Appl. Phys.*, 1992, vol. 31, no. 6R, art. 1860. DOI: <https://doi.org/10.1143/JJAP.31.1860>
- [16] Bufford D., Liu Y., Zhu Y., et al. Formation mechanisms of high-density growth twins in aluminum with high stacking-fault energy. *Mater. Res. Lett.*, 2013, vol. 1, iss. 1, pp. 51–60. DOI: <https://doi.org/10.1080/21663831.2012.761654>
- [17] Landry J.D., Mitchell E.N. New single-crystal orientations in epitaxial aluminum films. *J. Appl. Phys.*, 1969, vol. 40, iss. 8, pp. 3400–3402.
DOI: <https://doi.org/10.1063/1.1658199>
- [18] Von Bassewitz A., Mitchell E.N. Resistivity studies of single-crystal and polycrystal films of aluminum. *Phys. Rev.*, 1969, vol. 182, iss. 3, art. 712.
DOI: <https://doi.org/10.1103/PhysRev.182.712>
- [19] d’Heurle F., Ames I. Electromigration in single-crystal aluminum films. *Appl. Phys. Lett.*, 1970, vol. 16, iss. 2, pp. 80–81. DOI: <https://doi.org/10.1063/1.1653108>
- [20] Jayadevaiah T.S., Kirby R.E. Electrical conduction in single-crystal aluminum thin films. *Appl. Phys. Lett.*, 1969, vol. 15, iss. 5, pp. 150–152.
DOI: <https://doi.org/10.1063/1.1652945>
- [21] Lin S.-W., Wu J.-Y., Lin S.-D., et al. Characterization of single-crystalline aluminum thin film on (100) GaAs substrate. *Jpn. J. Appl. Phys.*, 2013, vol. 52, no. 4R, art. 045801. DOI: <https://doi.org/10.7567/JJAP.52.045801>
- [22] Megrant A., Neill C., Barends R., et al. Planar superconducting resonators with internal quality factors above one million. *Appl. Phys. Lett.*, 2012, vol. 100, iss. 11, art. 113510. DOI: <https://doi.org/10.1063/1.3693409>
- [23] Ludeke R., Chang L.L., Esaki L. Molecular beam epitaxy of alternating metal-semiconductor films. *Appl. Phys. Lett.*, 1973, vol. 23, iss. 4, pp. 201–203.
DOI: <https://doi.org/10.1063/1.1654858>
- [24] Richardson C.J., Siwak N.P., Hackley J., et al. Fabrication artifacts and parallel loss channels in metamorphic epitaxial aluminum superconducting resonators. *Supercond. Sci. Technol.*, 2016, vol. 29, no. 6, art. 064003.
DOI: <https://doi.org/10.1088/0953-2048/29/6/064003>
- [25] Chou Y.-H., Wu Y.-M., Hong K.-B., et al. High-operation-temperature plasmonic nanolasers on single-crystalline aluminum. *Nano Lett.*, 2016, vol. 16, no. 5, pp. 3179–3186. DOI: <https://doi.org/10.1021/acs.nanolett.6b00537>
- [26] Barends R., Kelly J., Megrant A., et al. Coherent Josephson qubit suitable for scalable quantum integrated circuits. *Appl. Phys. Lett.*, 2013, vol. 111, iss. 8, art. 080502.
DOI: <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.111.080502>

[27] Бабурин А.С., Габидуллин А.Р., Зверев А.В. и др. Получение пленок серебра методом электронно-лучевого испарения для применения в наноплазмонике. *Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Приборостроение*, 2016, № 6 (111), с. 4–14. DOI: <http://dx.doi.org/10.18698/0236-3933-2016-6-4-14>

[28] Rodionov I.A., Baburin A.S., Gabidullin A., et al. Quantum engineering of atomically smooth single-crystalline silver films. *Sci. Rep.*, 2019, vol. 9, art. 12232. DOI: <https://doi.org/10.1038/s41598-019-48508-3>

[29] Вайнштейн Б.К. Современная кристаллография. Т. 3. М., Наука, 1980.

[30] Magnfält D. Fundamental processes in thin film growth: the origin of compressive stress and the dynamics of the early growth stages. Linköping Univ. Electronic Press, 2014.

Андрощук Маргарита Васильевна — техник НОЦ «Функциональные микро/наносистемы» МГТУ им. Н.Э. Баумана (Российская Федерация, 105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1).

Москалев Дмитрий Олегович — канд. техн. наук, ведущий инженер НОЦ «Функциональные микро/наносистемы» МГТУ им. Н.Э. Баумана (Российская Федерация, 105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1); научный сотрудник ФГУП «ВНИИА» (Российская Федерация, 127055, Москва, Сущевская ул., д. 22).

Коршаков Никита Денисович — инженер-исследователь НОЦ «Функциональные микро/наносистемы» МГТУ им. Н.Э. Баумана (Российская Федерация, 105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1); младший научный сотрудник ФГУП «ВНИИА» (Российская Федерация, 127055, Москва, Сущевская ул., д. 22).

Константинова Татьяна Григорьевна — младший научный сотрудник НОЦ «Функциональные микро/наносистемы» МГТУ им. Н.Э. Баумана (Российская Федерация, 105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1).

Сорокина Ольга Сергеевна — инженер НОЦ «Функциональные микро/наносистемы» МГТУ им. Н.Э. Баумана (Российская Федерация, 105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1); старший научный сотрудник ФГУП «ВНИИА» (Российская Федерация, 127055, Москва, Сущевская ул., д. 22).

Фокин Денис Александрович — канд. физ.-мат. наук, заведующий лабораторией новых материалов НОЦ «Функциональные микро/наносистемы» МГТУ им. Н.Э. Баумана (Российская Федерация, 105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1).

Бабурин Александр Сергеевич — канд. техн. наук, ведущий инженер НОЦ «Функциональные микро/наносистемы» МГТУ им. Н.Э. Баумана (Российская Федерация, 105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1); начальник группы ФГУП «ВНИИА» (Российская Федерация, 127055, Москва, Сущевская ул., д. 22).

Панфилов Юрий Васильевич — д-р техн. наук, профессор, заведующий кафедрой «Электронные технологии в машиностроении» МГТУ им. Н.Э. Баумана (Российская Федерация, 105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1).

Рыжиков Илья Анатольевич — канд. техн. наук, доцент, заведующий НОЦ «Функциональные микро/наносистемы» МГТУ им. Н.Э. Баумана (Российская Федерация, 105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1); заведующий научно-исследовательским отделом ИТПЭ РАН (Российская Федерация, 125412, Москва, Ижорская ул., д. 13).

Родионов Илья Анатольевич — канд. техн. наук, директор НОЦ «Функциональные микро/наносистемы» МГТУ им. Н.Э. Баумана (Российская Федерация, 105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1); научный руководитель по направлению — начальник лаборатории ФГУП «ВНИИА» (Российская Федерация, 127055, Москва, Сушевская ул., д. 22).

Просьба ссылаться на эту статью следующим образом:

Андрощук М.В., Москалев Д.О., Коршаков Н.Д. и др. Формирование монокристаллических пленок алюминия на базе SCULL-технологии. *Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Естественные науки*, 2024, № 5 (116), с. 56–70.

EDN: MBZAUW

SINGLE-CRYSTAL ALUMINUM FILM FORMATION USING THE SCULL TECHNOLOGY

M.V. Androshchuk¹

D.O. Moskaev^{1,2}

N.D. Korshakov^{1,2}

T.G. Konstantinova¹

O.S. Sorokina^{1,2}

D.A. Fokin¹

A.S. Baburin^{1,2}

Yu.V. Panfilov¹

I.A. Ryzhikov^{1,3}

I.A. Rodionov^{1,2}

androschukmv@student.bmstu.ru

moskalevdm@bmstu.ru

korshakov@bmstu.ru

tgkonst@bmstu.ru

soros@bmstu.ru

fokinda@bmstu.ru

baburin@bmstu.ru

panfilov@bmstu.ru

ilyaryzhikov@rambler.ru

irodionov@bmstu.ru

¹ Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russian Federation

² Dukhov Automatics Research Institute (VNIIA), Moscow, Russian Federation

³ Institute of Theoretical and Applied Electrodynamics, Russian Academy of Science, Moscow, Russian Federation

Abstract

The article presents results of a comprehensive study of the island stage in thin aluminum film growth required to form a seed layer and the built on it continuous single-crystal thin film using the SCULL technology. Influence of the electron beam evaporation process parameters, i.e., substrate temperature during thin film growth at 200–500 °C and seed layer thickness of 3–5 nm, on the islands' lateral size was studied. Experimental samples were examined using scanning electron microscopy, electron backscatter diffraction, X-ray diffraction, and atomic force microscopy. The study resulted in obtaining the dependence of alteration in the growth pattern of the aluminum thin film seed layer on the deposition process parameters. The developed technology of forming a seed layer on the Si(111) silicon substrate matched with aluminum by a constant lattice made it possible to obtain a continuous aluminum film with the single-crystal structure on its basis, its thickness was 35 nm. The mean-square roughness of the film was less than 0.4 nm, FWHM = 0.453°

Keywords

Thin aluminum film, electron-beam evaporation, SCULL technology, single-crystal film

Received 04.12.2023

Accepted 26.02.2024

© Author(s), 2024

Experimental samples and technology were developed at the Bauman Moscow State Technical University Technology Center (Scientific-Educational Center of Functional Micro/Nanosystems, ID 74300). The work was carried out using the Dimension Icon atomic force microscope, which is a part of the Avogadro unique scientific installation (<http://avo.ibmc.msk.ru/>)

REFERENCES

- [1] McSkimming B.M., Alexander A., Samuels M.H., et al. Metamorphic growth of relaxed single crystalline aluminum on silicon (111). *J. Vac. Sci. Technol. A*, 2017, vol. 35, iss. 2, art. 02401. DOI: <https://doi.org/10.1116/1.4971200>
- [2] Vesseur E.J.R., de Waele R., Lezec H.J., et al. Surface plasmon polariton modes in a single-crystal Au nanoresonator fabricated using focused-ion-beam milling. *Appl. Phys. Lett.*, 2008, vol. 92, iss. 8, art. 083110. DOI: <https://doi.org/10.1063/1.2885344>
- [3] Huang J.-S., Callegari V., Geisler P., et al. Atomically flat single-crystalline gold nanostructures for plasmonic nanocircuitry. *Nat. Commun.*, 2010, vol. 1, art. 150. DOI: <https://doi.org/10.1038/ncomms1143>
- [4] Lu Y.-J., Kim J., Chen H.-Y., et al. Plasmonic nanolaser using epitaxially grown silver film. *Science*, 2012, vol. 337, no. 6093, pp. 450–453. DOI: <https://doi.org/10.1126/science.1223504>

- [5] Koch J., Terri M.Y., Gambetta J., et al. Charge-insensitive qubit design derived from the Cooper pair box. *Phys. Rev. A*, 2007, vol. 76, iss. 4, art. 042319.
DOI: <https://doi.org/10.1103/PhysRevA.76.042319>
- [6] Barends R., Kelly J., Megrant A., et al. Superconducting quantum circuits at the surface code threshold for fault tolerance. *Nature*, 2014, vol. 508, no. 7497, pp. 500–503.
DOI: <https://doi.org/10.1038/nature13171>
- [7] Kim Z., Suri B., Zaretsky V., et al. Decoupling a Cooper-pair box to enhance the lifetime to 0.2 ms. *Phys. Rev. Lett.*, 2011, vol. 106, iss. 12, art. 120501.
DOI: <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.106.120501>
- [8] Gol'tsman G.N., Okunev O., Chulkova G., et al. Picosecond superconducting single-photon optical detector. *Appl. Phys. Lett.*, 2001, vol. 79, iss. 6, pp. 705–707.
DOI: <https://doi.org/10.1063/1.1388868>
- [9] Hofheinz M., Wang H., Ansmann M., et al. Synthesizing arbitrary quantum states in a superconducting resonator. *Nature*, 2009, vol. 459, no. 7246, pp. 546–549.
DOI: <https://doi.org/10.1038/nature08005>
- [10] Wang H., Hofheinz M., Wenner J., et al. Improving the coherence time of superconducting coplanar resonators. *Appl. Phys. Lett.*, 2009, vol. 95, iss. 23, art. 233508.
DOI: <https://doi.org/10.1063/1.3273372>
- [11] Mariani M., Wang H., Yamamoto T., et al. Implementing the quantum von Neumann architecture with superconducting circuits. *Science*, 2011, vol. 334, no. 6052, pp. 61–65. DOI: <https://doi.org/10.1126/science.1208517>
- [12] Choi C.-H., Harper R.A., Yapsir A.S., et al. Epitaxial growth of Al(111)/Si(111) films using partially ionized beam deposition. *Appl. Phys. Lett.*, 1987, vol. 51, iss. 24, pp. 1992–1994. DOI: <https://doi.org/10.1063/1.98321>
- [13] Choi C.-H., Ramanarayanan R., Mei S.N., et al. Control of Al orientation on Si(100) substrate using a partially ionized beam. *MRS Online Proceedings Library*, 1987, vol. 93, pp. 267–271. DOI: <https://doi.org/10.1557/PROC-93-267>
- [14] Yamada I., Takagi T. Metallization by ionized cluster beam deposition. *IEEE Trans. Electron. Devices*, 1987, vol. 34, iss. 5, pp. 1018–1025.
DOI: <https://doi.org/10.1109/T-ED.1987.23038>
- [15] Nakajima Y., Kusuyama K., Yamaguchi H., et al. Growth of single-crystal aluminum films on silicon substrates by DC magnetron sputtering. *Jpn. J. Appl. Phys.*, 1992, vol. 31, no. 6R, art. 1860. DOI: <https://doi.org/10.1143/JJAP.31.1860>
- [16] Bufford D., Liu Y., Zhu Y., et al. Formation mechanisms of high-density growth twins in aluminum with high stacking-fault energy. *Mater. Res. Lett.*, 2013, vol. 1, iss. 1, pp. 51–60. DOI: <https://doi.org/10.1080/21663831.2012.761654>
- [17] Landry J.D., Mitchell E.N. New single-crystal orientations in epitaxial aluminum films. *J. Appl. Phys.*, 1969, vol. 40, iss. 8, pp. 3400–3402.
DOI: <https://doi.org/10.1063/1.1658199>
- [18] Von Bassewitz A., Mitchell E.N. Resistivity studies of single-crystal and polycrystal films of aluminum. *Phys. Rev.*, 1969, vol. 182, iss. 3, art. 712.
DOI: <https://doi.org/10.1103/PhysRev.182.712>

- [19] d'Heurle F., Ames I. Electromigration in single-crystal aluminum films. *Appl. Phys. Lett.*, 1970, vol. 16, iss. 2, pp. 80–81. DOI: <https://doi.org/10.1063/1.1653108>
- [20] Jayadevaiah T.S., Kirby R.E. Electrical conduction in single-crystal aluminum thin films. *Appl. Phys. Lett.*, 1969, vol. 15, iss. 5, pp. 150–152. DOI: <https://doi.org/10.1063/1.1652945>
- [21] Lin S.-W., Wu J.-Y., Lin S.-D., et al. Characterization of single-crystalline aluminum thin film on (100) GaAs substrate. *Jpn. J. Appl. Phys.*, 2013, vol. 52, no. 4R, art. 045801. DOI: <https://doi.org/10.7567/JJAP.52.045801>
- [22] Megrant A., Neill C., Barends R., et al. Planar superconducting resonators with internal quality factors above one million. *Appl. Phys. Lett.*, 2012, vol. 100, iss. 11, art. 113510. DOI: <https://doi.org/10.1063/1.3693409>
- [23] Ludeke R., Chang L.L., Esaki L. Molecular beam epitaxy of alternating metal-semiconductor films. *Appl. Phys. Lett.*, 1973, vol. 23, iss. 4, pp. 201–203. DOI: <https://doi.org/10.1063/1.1654858>
- [24] Richardson C.J., Siwak N.P., Hackley J., et al. Fabrication artifacts and parallel loss channels in metamorphic epitaxial aluminum superconducting resonators. *Supercond. Sci. Technol.*, 2016, vol. 29, no. 6, art. 064003. DOI: <https://doi.org/10.1088/0953-2048/29/6/064003>
- [25] Chou Y.-H., Wu Y.-M., Hong K.-B., et al. High-operation-temperature plasmonic nanolasers on single-crystalline aluminum. *Nano Lett.*, 2016, vol. 16, no. 5, pp. 3179–3186. DOI: <https://doi.org/10.1021/acs.nanolett.6b00537>
- [26] Barends R., Kelly J., Megrant A., et al. Coherent Josephson qubit suitable for scalable quantum integrated circuits. *Appl. Phys. Lett.*, 2013, vol. 111, iss. 8, art. 080502. DOI: <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.111.080502>
- [27] Baburin A.S., Gabidullin A.R., Zverev A.V., et al. Silver films deposited by electron-beam evaporation for application in nanoplasmonics. *Herald of the Bauman Moscow State Technical University, Series Instrument Engineering*, 2016, no. 6 (111), pp. 4–14 (in Russ.). DOI: <http://dx.doi.org/10.18698/0236-3933-2016-6-4-14>
- [28] Rodionov I.A., Baburin A.S., Gabidullin A., et al. Quantum engineering of atomically smooth single-crystalline silver films. *Sci. Rep.*, 2019, vol. 9, art. 12232. DOI: <https://doi.org/10.1038/s41598-019-48508-3>
- [29] Vaynshteyn B.K. *Sovremennaya kristallografiya. T. 3 [Modern crystallography. Vol. 3]*. Moscow, Nauka Publ., 1980.
- [30] Magnfält D. *Fundamental processes in thin film growth: the origin of compressive stress and the dynamics of the early growth stages*. Linköping Univ. Electronic Press, 2014.

Androshchuk M.V. — Technician, Scientific-Educational Center of Functional Micro/Nanosystems, Bauman Moscow State Technical University (2-ya Bauman-skaya ul. 5, str. 1, Moscow, 105005 Russian Federation).

Moskalev D.O. — Cand. Sc. (Eng.), Lead Engineer, Scientific-Educational Center of Functional Micro/Nanosystems, Bauman Moscow State Technical University (2-ya Baumanskaya ul. 5, str. 1, Moscow, 105005 Russian Federation); Research Scientist, Dukhov Automatics Research Institute (VNIIA) (Sushchevskaya ul. 22, Moscow, 127055 Russian Federation).

Korshakov N.D. — Engineer-Researcher, Scientific-Educational Center of Functional Micro/Nanosystems, Bauman Moscow State Technical University (2-ya Baumanskaya ul. 5, str. 1, Moscow, 105005 Russian Federation); Junior Research Scientist, Dukhov Automatics Research Institute (VNIIA) (Sushchevskaya ul. 22, Moscow, 127055 Russian Federation).

Konstantinova T.G. — Junior Research Scientist, Scientific-Educational Center of Functional Micro/Nanosystems, Bauman Moscow State Technical University (2-ya Baumanskaya ul. 5, str. 1, Moscow, 105005 Russian Federation).

Sorokina O.S. — Senior Research Scientist, Dukhov Automatics Research Institute (VNIIA) (Sushchevskaya ul. 22, Moscow, 127055 Russian Federation).

Fokin D.A. — Cand. Sc. (Phys.-Math.), Head of Laboratory of New Materials, Scientific-Educational Center of Functional Micro/Nanosystems, Bauman Moscow State Technical University (2-ya Baumanskaya ul. 5, str. 1, Moscow, 105005 Russian Federation).

Baburin A.S. — Cand. Sc. (Eng.), Lead Engineer, Scientific-Educational Center of Functional Micro/Nanosystems, Bauman Moscow State Technical University (2-ya Baumanskaya ul. 5, str. 1, Moscow, 105005 Russian Federation); Head of Group, Dukhov Automatics Research Institute (VNIIA) (Sushchevskaya ul. 22, Moscow, 127055 Russian Federation).

Panfilov Yu.V. — Dr. Sc. (Eng.), Professor, Head of the Department of Electronic Technology in Mechanical Engineering, Bauman Moscow State Technical University (2-ya Baumanskaya ul. 5, str. 1, Moscow, 105005 Russian Federation).

Ryzhikov I.A. — Cand. Sc. (Eng.), Assoc. Professor, Head of the Scientific-Educational Center of Functional Micro/Nanosystems, Bauman Moscow State Technical University (2-ya Baumanskaya ul. 5, str. 1, Moscow, 105005 Russian Federation); Head of the Research Department Institute of Theoretical and Applied Electrodynamics, Russian Academy of Science (Izhorskaya ul. 13, Moscow, 125412 Russian Federation).

Rodionov I.A. — Cand. Sc. (Eng.), Director of the Scientific-Educational Center of Functional Micro/Nanosystems, Bauman Moscow State Technical University (2-ya Baumanskaya ul. 5, str. 1, Moscow, 105005 Russian Federation); Scientific Supervisor in the field — Head of the Laboratory, Dukhov Automatics Research Institute (VNIIA) (Sushchevskaya ul. 22, Moscow, 127055 Russian Federation).

Please cite this article in English as:

Androshchuk M.V., Moskalev D.O., Korshakov N.D., et al. Single-crystal aluminum film formation using the SCULL technology. *Herald of the Bauman Moscow State Technical University, Series Natural Sciences*, 2024, no. 5 (116), pp. 56–70 (in Russ.).

EDN: MBZAUW