

Автоматизация и управление технологическими процессами и производствами, системы автоматизации проектирования

Научная статья

Статья в открытом доступе

УДК 621.382.2/.3

doi: 10.30987/2658-6436-2024-3-4-12

ПРИМЕНЕНИЕ СКАНИРУЮЩЕЙ ЭЛЕКТРОННОЙ МИКРОСКОПИИ В РЕВЕРС-ИНЖИНИРИНГЕ ЭЛЕКТРОННОЙ КОМПОНЕНТНОЙ БАЗЫ

**Алексей Алексеевич Малаханов¹, Александр Анатольевич Пугачев²,
Валерия Константиновна Маркова^{3✉}**

^{1, 2, 3} Брянский государственный технический университет, г. Брянск, Россия

¹ malakhan@yandex.ru, <http://orcid.org/0000-0003-2512-8206>

² alexander-pugachev@rambler.ru, <http://orcid.org/0000-0002-1836-0923>

³ markovaic4499@mail.ru

Аннотация. Показана актуальность применения сканирующей электронной микроскопии в задачах анализа и синтеза микро- и наноразмерных структур полупроводниковых приборов. Целью статьи является анализ качества структур полупроводниковых приборов в составе интегральных микросхем, восстановление последовательности технологических операций и реверс-инжиниринга. Для достижения поставленной цели были решены следующие задачи: исследованы диэлектрические и проводящие структуры полупроводниковых приборов в составе интегральных микросхем, проанализированы результаты измерения линейных размеров элементов полупроводниковых приборов, вычислен коэффициент запыленности. Исследование проведено с помощью методов натурального эксперимента, цифровых методов обработки графической информации. В качестве исходных данных выбран образец интегральной микросхемы, выполненной полевой технологией; информационно-измерительная система построена на базе сканирующего электронного микроскопа КУКУ-8000 с управляющим компьютером. В результате получены изображения структур элементов полевых транзисторов в составе интегральной микросхемы, на основе которых рассчитан коэффициент запыленности. Полученные результаты показали, что с помощью сканирующей электронной микроскопии возможно проведение анализа технологии изготовления полупроводниковых приборов, определение последовательности выполнения и особенности технологических операций, выявление причин брака продукции с целью оптимизации технологических процессов изготовления.

Ключевые слова: сканирующая электронная микроскопия, сечение, подзатворный диэлектрик, шина, коэффициент запыленности, реверс-инжиниринг

Финансирование: Работа выполнена при поддержке Минобрнауки России в рамках Федерального Проекта «Подготовка кадров и научного фундамента для электронной промышленности» государственной программы Российской Федерации «Научно-технологическое развитие Российской Федерации» при реализации Программы развития «Учебный дизайн-центр «Разработка, испытания и реверс-инжиниринг электронной компонентной базы» (соглашение от 05.03.2024 г. № 075-02-2024-1513) в ФГБОУ ВО «Брянский государственный технический университет».

Для цитирования: Малаханов А.А., Пугачев А.А., Маркова В.К. Применение сканирующей электронной микроскопии в реверс-инжиниринге электронной компонентной базы // Автоматизация и моделирование в проектировании и управлении. 2024. №3 (25). С. 4-12. doi: 10.30987/2658-6436-2024-3-4-12.

Original article

Open Access Article

APPLYING SCANNING ELECTRON MICROSCOPY IN REVERSE ENGINEERING OF ELECTRONIC COMPONENT BASE

Alexey A. Malakhanov¹, Alexander A. Pugachev², Valeria K. Markova³✉

^{1, 2, 3} Bryansk State Technical University, Bryansk, Russia

¹ malakhan@yandex.ru, <http://orcid.org/0000-0003-2512-8206>

² alexander-pugachev@rambler.ru, <http://orcid.org/0000-0002-1836-0923>

³ markovaic4499@mail.ru

Abstract. *The article shows the relevance of scanning electron microscopy in the problems of analysing and synthesising micro- and nanoscale structures of semiconductor devices. The aim of the article is to analyze the structure quality of semiconductor devices in integrated circuits, to restore the sequence of technological operations and reverse engineering. To achieve this goal, the following tasks are solved: dielectric and conductive structures of semiconductor devices in integrated circuits are studied, the results of measuring the linear dimensions of the semiconductor device elements are analyzed, the dustiness coefficient is calculated. The study applies the methods of a full-scale experiment, digital methods of processing graphic information. A sample of an integrated circuit manufactured using field technology is selected as the initial data; the information and measuring system is built on the basis of a KYKY 8000 scanning electron microscope with a control computer. As a result, images of the element structures of field-effect transistors in the integrated circuit are obtained, on the basis of which the dustiness coefficient is calculated. The results show that with the help of scanning electron microscopy it is possible to analyze the technology of manufacturing semiconductor devices, to determine the sequence of execution and features of technological operations, to identify the causes of product defects to optimize technological manufacturing processes.*

Keywords: scanning electron microscopy, section, gate dielectric, busbar, dustiness coefficient, reverse engineering

Funding: The work is carried out with the support of the Ministry of Education and Science of the Russian Federation within the framework of the Federal Project “Training of Personnel and Scientific Foundation for the Electronic Industry” of the state program of the Russian Federation “Scientific and Technological Development of the Russian Federation” in implementing the Development Program “Educational Design Centre of Development, Testing and Reverse Engineering of Electronic Component Base” (agreement No. 075-02-2024-1513 of 2024 March 05) at the Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education Bryansk State Technical University.

For citation: Malakhanov A.A., Pugachev A.A., Markova V.K. Applying Scanning Electron Microscopy in Reverse Engineering of Electronic Component Base. Automation and modeling in design and management, 2024, no. 3 (25). pp. 4-12. doi: 10.30987/2658-6436-2024-3-4-12.

Введение

Совершенствование работы и повышение энергетической эффективности электронных и электротехнических изделий приводит к появлению новых требований как к силовой части объектов управления, так и к их системам управления [1, 2]. Развитие преобразовательной техники и систем управления электронными преобразователями требует наличия современной, надежной, недорогой и доверенной электронной компонентной базы [3, 4]. В связи с уходом с рынка Российской Федерации ряда зарубежных компаний и поставщиков зарубежной электронной компонентной базы требуется замещение этой базы отечественными аналогами с идентичными характеристиками, отвечающих требованиям разработчиков электронной техники.

Для изготовления аналогов таких компонентов требуется изучение конструктивно-технологических и схмотехнических вариантов таких изделий, а также адаптация к технологическим возможностям, имеющихся на отечественных предприятиях, т.е. требуется провести реверс-инжиниринг электронных компонентов.

Одним из этапов реверс-инжиниринга является исследование и анализ микро- и наноразмерных структур полупроводниковых приборов.

Сканирующая электронная микроскопия находит широкое применение для исследования микрообъектов и элементов структур полупроводниковых приборов и интегральных микросхем [5, 6]. Анализ изображений, полученных с помощью сканирующих электронных микроскопов (SEM), позволяет инженерам-конструкторам и технологам проводить детальные исследования структур и делать выводы об их качестве, наличии

дефектов, возможных отклонениях в процессе изготовления. Например, неровность краев металлических шин связана с параметрами фотолитографии и плазменного травления алюминия, структура зерен алюминия зависит от процесса осаждения и вжигания металла, профиль контактных окон может изменяться от способов травления контактов и осаждения металла [7, 8]. Особенно полезными эти данные становятся при сравнении результатов процессов, выполненных на разных установках и с разными по длительности процессами.

SEM позволяет изучать микро- и наноразмерные объекты при большем увеличении, значительно превышающим доступное для оптических микроскопов. В сочетании с возможностью поворачивать образец под различными углами, SEM становится незаменимым при исследовании структур, полученных в результате процессов фотолитографии, травления, нанесения и прочих операций [9]. Наличие дополнительной системы энергодисперсионного анализа в сканирующем микроскопе позволяет в дальнейшем оценить качественный и количественный состав материалов в исследуемых образцах.

В данной работе использование сканирующей микроскопии преимущественно направлено на анализ структуры полевого транзистора в составе интегральной микросхемы в целях изучения технологии формирования подзатворного диэлектрика и выполнения металлизации для последующего реверс-инжиниринга подобных структур в составе других микросхем.

Материалы, модели, эксперименты и методы

Первой задачей SEM являлся анализ сечений (кросс-сечений) интегральной микросхемы с транзисторными структурами. Метод получения сечений является разрушающим: в образце тем или иным способом формируется сечение в вертикальной плоскости, которое затем исследуется с помощью SEM. Такой способ позволяет получить наиболее ценную информацию об образце – взаимное расположение различных слоев и их поведение на рельефах предыдущих слоев.

Для изготовления и анализа сечений был выполнен скол пластины, со сформированными в ней структурами полевых транзисторов. Пластины «электронного» кремния обладают практически идеальной кристаллической структурой, поэтому при попытке разломать пластину или отдельный кристалл микросхемы, разрушение будет происходить в наиболее слабых кристаллографических плоскостях [10]. При использовании кремниевых пластин с ориентацией поверхности (100), такими плоскостями являются направления (110) (рис. 1). В результате скол можно провести строго горизонтально или вертикально.

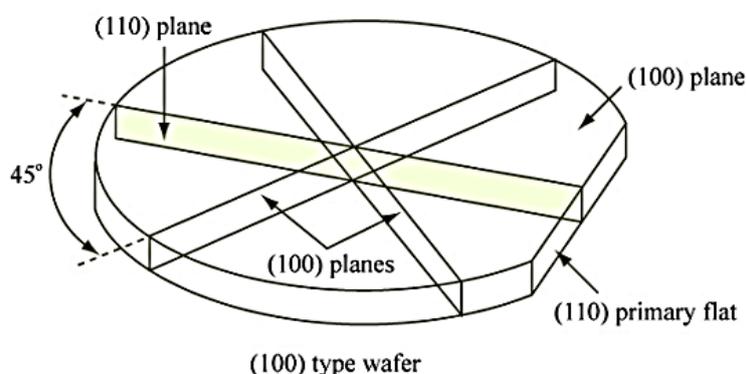


Рис. 1. Расположение кристаллографических плоскостей кремниевых пластин [10]
Fig. 1. The position of crystallographic planes of silicon wafers [10]

После формирования скола пластины получено изображение общего вида сечения длиной 40 мкм (рис. 2). Данное изображение получено с помощью датчика вторичных электронов SE (secondary electrons) при ускоряющем напряжении зонда HV (high voltage) 10 кВ. Увеличение MAG (magnification) составило 1220 раз при рабочем расстоянии WD (working

distance) в 15,18 мм. Рабочее расстояние представляет собой расстояние между точкой фокусировки луча зонда и датчиком вторичных электронов. Следовательно, чем меньше рабочее расстояние, тем больше увеличение и качество получаемого изображения, поскольку большее количество вторичных электронов достигнет датчика.

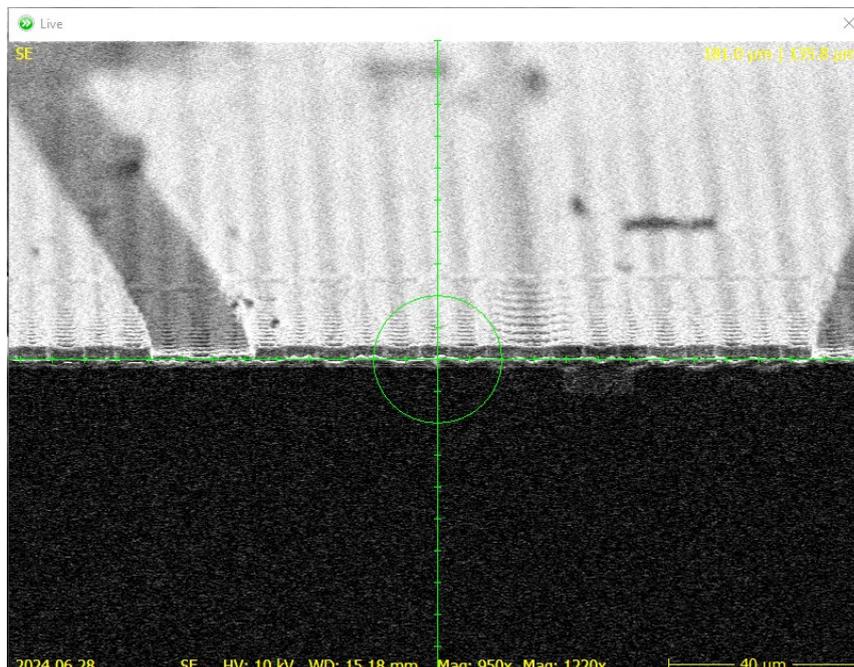


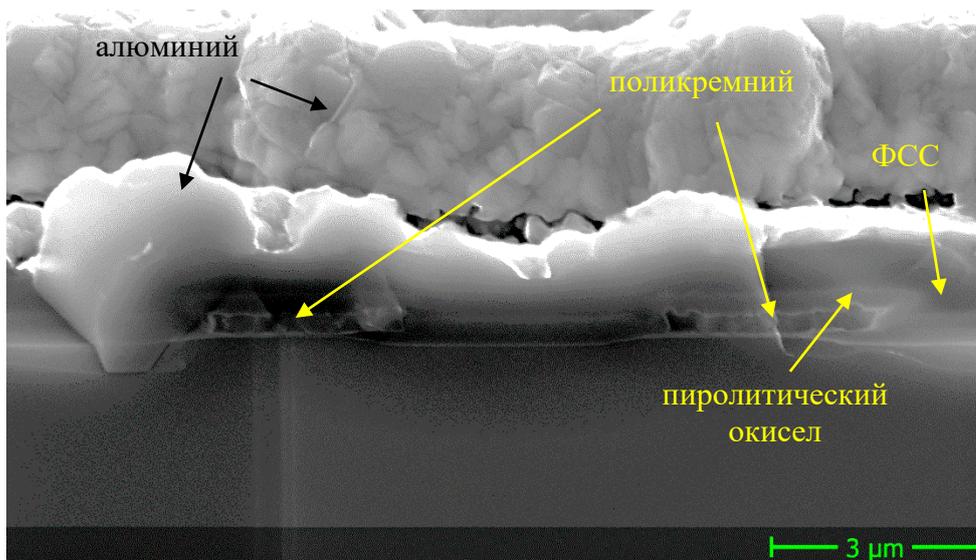
Рис. 2. Общий вид исследуемого сечения пластины
Fig. 2. A view of the investigated section of the plate

Управляя увеличением и фокусным расстоянием сканирующего микроскопа, выявлено подходящее для исследования сечение полевого транзистора с четко различимыми структурами и технологическими слоями металлизации алюминия, окислов, ФСС (рис. 3).

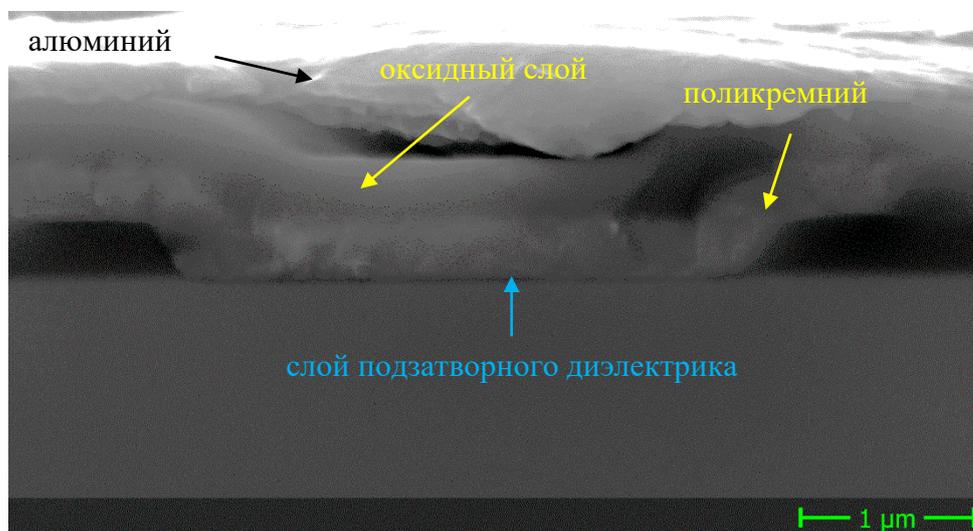
Эти изображения представляют собой общий вид сечения полевого транзистора и не являются достаточно информативными для того, чтобы с их помощью можно было измерить толщину подзатворного диэлектрика. Поэтому дополнительно были проведены исследования с большим увеличением (89 000 раз) и большим ускоряющим напряжением зонда (15 кВ), а также было уменьшено до 9,4 мм рабочее расстояние между точкой фокусировки луча зонда и датчиком вторичных электронов. В результате этих исследований были выполнены замеры толщины слоя подзатворного диэлектрика на отрезке длиной 400 нм (рис. 4). Как можно увидеть, толщина подзатворного диэлектрика неравномерная и имеет значение толщины от 37 до 45 нм.

Второй задачей стало исследование поверхности кристалла интегральной микросхемы, а именно изучение качества металлизации. Работа по исследованию поверхности простая и выполняется достаточно быстро, но при этом она не дает полной информации о конструктивно-технологических особенностях образца и требуется проводить исследования кристалла под разными углами [11]. В рамках этих исследований поверхности кристаллов были измерены линейные размеры шин металлизации и рассчитаны коэффициенты запыленности металлических пленок.

Основное отличие этой задачи от предыдущей состоит в том, что необходимо проводить исследование проводящего материала, а ранее рассматривался непроводящий. Исследование проводящих материалов представляет собой более простую задачу, поскольку они содержат в себе большее количество свободных электронов, нежели непроводящие. В связи с этим сканирующий луч микроскопа выбивает с поверхности проводника большее количество вторичных электронов, а значит соответствующий детектор вторичных электронов получит на свой вход больше информации, нежели при сканировании непроводящего материала [12, 13].



a)



b)

Рис. 3. Изображения сечений полевых транзисторов (а, б), сделанные с помощью сканирующего микроскопа

Fig. 3. Images of cross-sections of field-effect transistors (a, b) taken using a scanning microscope

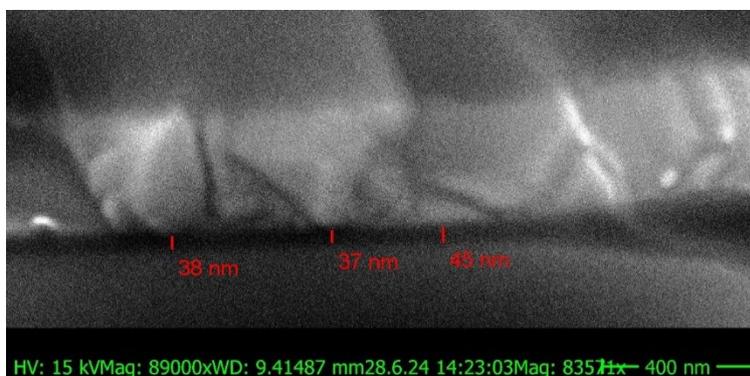


Рис. 4. Изображение подзатворного диэлектрика с размерами

Fig. 4. An image of gate dielectric with dimensions

Для измерения ширины шин металлизации образец располагается перпендикулярно относительно сканирующего луча микроскопа. Результаты измерения ширины шин приведены на рис. 5.

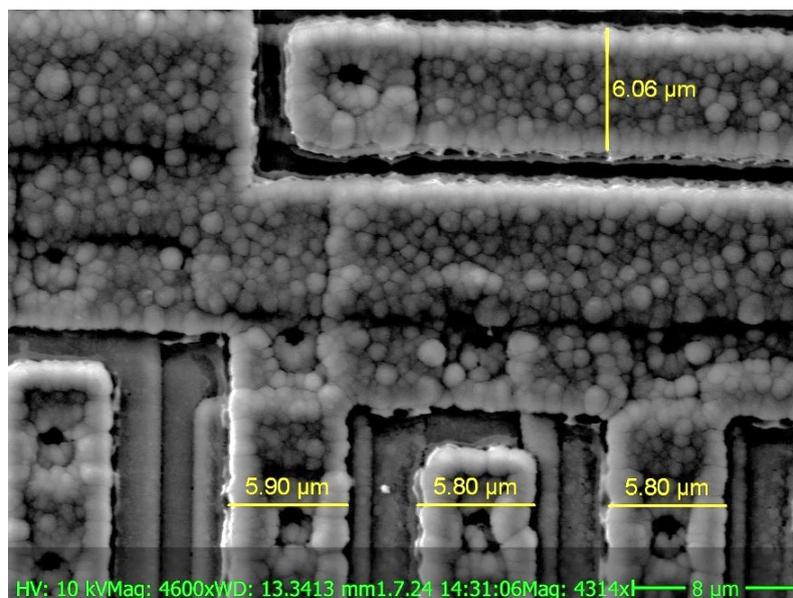


Рис. 5. Измерения ширины различных шин металлизации на поверхности пластины
Fig. 5. Measurements of the width of various metallization buses on the surface of the plate

Для измерения толщины шин металлизации образец располагался под углом 45° относительно сканирующего луча микроскопа. Результаты измерения толщины шин приведены на рис. 6.

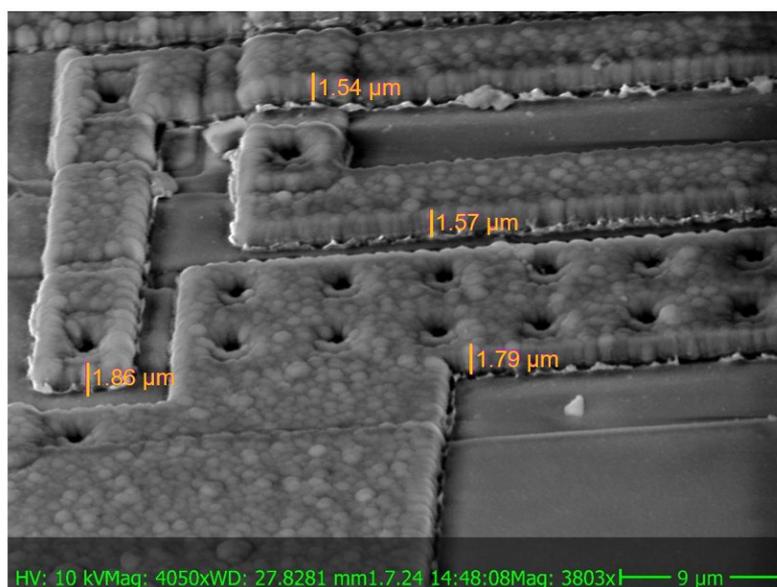


Рис. 6. Измерения толщины различных шин металлизации на поверхности пластины
Fig. 6. Measurements of the thickness of various metallization buses on the surface of the plate

Изображения получены при одинаковых ускоряющих напряжениях зонда сканирующего микроскопа (10 кВ), однако в первом случае было необходимо уменьшить рабочее расстояние (13,3 мм), чтобы получить большее увеличение, составившее 4600 раз.

На рис. 5 и 6 отчетливо видна структура слоя алюминия, из которого выполнены шины многоуровневой металлизации. Алюминий имеет неровную, зернистую структуру с перепадами высоты от 1,57 мкм до 1,86 мкм. Также отчетливо наблюдаются впадины, являющиеся контактными областями к элементам полупроводникового кристалла.

Вычисление коэффициента запыленности позволяет оценить качество нанесения металлических пленок и, следовательно, произвести контроль качества выпускаемой продукции. Коэффициент запыленности представляет собой отношение наименьшей толщины металлической пленки на изгибе к средней толщине металлической пленки (рис. 7).

Для того чтобы изделие отвечало требованиям качества, необходимо иметь коэффициент запыленности не менее 0,5.

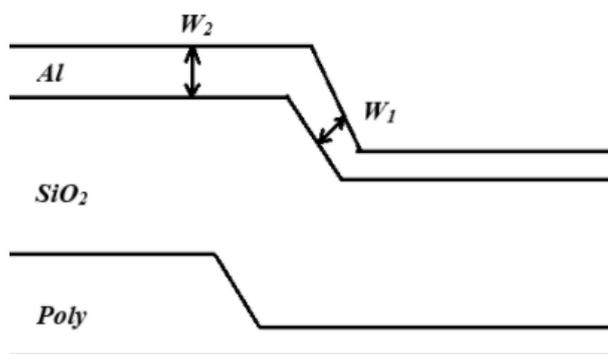


Рис. 7. Схематическое изображение для определения коэффициента запыленности
 Fig. 7. A schematic representation for determining the dustiness coefficient

Из параметров металлической пленки, представленной на рис. 7, коэффициент запыленности k определится как:

$$k = \frac{W_1}{W_2} > 0,5. \quad (1)$$

Это связано с тем, что при слишком узких и тонких шинах металлизации возможны локальные перегревы структуры вследствие прохождения через них электрического тока. Также истончение шин приводит к их механическому разрушению (трещины, сколы, разрывы). Таким образом это может привести к ухудшению электрофизических параметров микросхемы или к выходу ее из строя.

Для вычисления коэффициента запыленности исследуемого образца получено изображение шины металлизации (рис. 8) при ускоряющем напряжении зонда 10 кВ и увеличении 8230 раз.

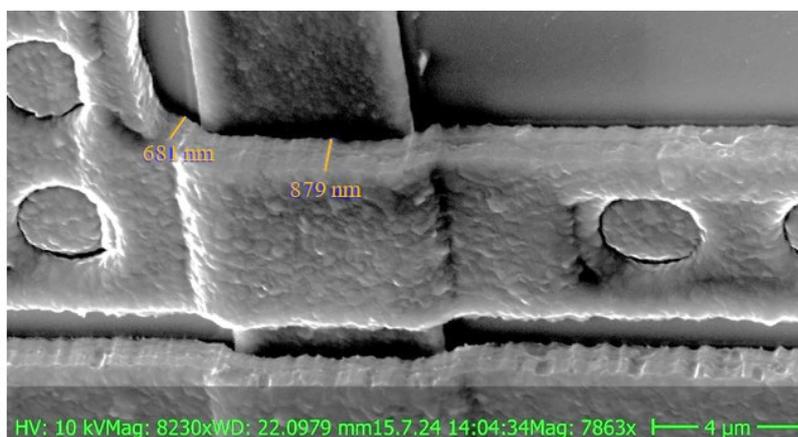


Рис. 8. Шина металлизации для измерения коэффициента запыленности
 Fig. 8. The metallization bus for measuring dustiness coefficient

Из рис. 8 по выражению (1) вычислен коэффициент запыленности:

$$k = \frac{681 \cdot 10^{-9}}{879 \cdot 10^{-9}} \approx 0,77.$$

Чем ближе коэффициент запыленности к единице, тем качественнее выполнено напыление металла. Так, например, на рис. 9, полученном при ускоряющем напряжении 10 кВ и увеличении 19 500 раз, приведено изображение шины металла, для которой $k \approx 0,93$.

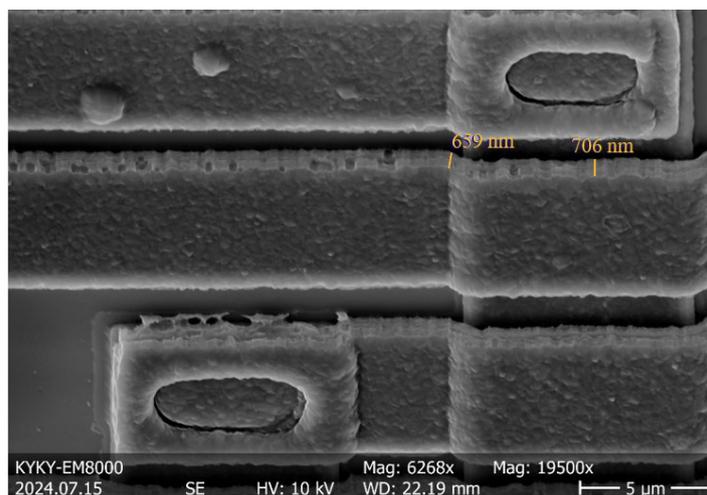


Рис. 9. Шина металлизации для измерения коэффициента запыленности
Fig. 9. The metallization bus for measuring dustiness coefficient

Основываясь на данных микроскопических исследований с помощью SEM, можно выявить дефекты структур, обосновать параметры технологических процессов для качественного изготовления структур полупроводниковых приборов.

Заключение

В результате работы были получены изображения диэлектрических и проводящих полупроводниковых структур полевых транзисторов в составе интегральной микросхемы, определены линейные размеры элементов структур, что позволит более точно оценить параметры технологических процессов, обеспечивающих требуемый конструктивно-технологический вариант полупроводникового прибора при реверс-инжиниринге. Вычислен коэффициент запыленности металлических пленок, который является важным параметром для контроля качества и надежности металлизации.

Использование сканирующей электронной микроскопии в рамках выполнения реверс-инжиниринга позволяет анализировать технологию изготовления полупроводниковых приборов, определять последовательность выполнения и особенности технологических операций, выявлять причины брака продукции с целью оптимизации технологических процессов изготовления.

Список источников:

1. Чуприна Н.В., Пугачев А.А. Моделирование системы «синхронный генератор – преобразователь частоты – синхронный двигатель» // Автоматизация и моделирование в проектировании и управлении. – 2023. – № 3. – С. 89-96.
2. Андриянов А.И. Расчет оптимальных параметров систем управления нелинейными динамическими процессами импульсных преобразователей напряжения // Автоматизация и моделирование в проектировании и управлении. – 2022. – № 4. – С. 87-96.
3. Беспалов А.В., Гераськин А.А., Смирнов Д.О. Сертификация – инструмент обеспечения доверенности // Наноиндустрия. – 2023. – Т. 16, № S9-1(119). – С. 206-208.
4. Горбунов М.С. Платформенные решения для создания доверенной отказоустойчивой электронной компонентной базы // Безопасность информационных технологий. – 2022. – Т. 29, № 2. – С. 85-99.
5. Синдо Д., Оикава Т. Аналитическая просвечивающая электронная микроскопия. – М.: Техносфера, 2006. – 249 с.

References:

1. Chuprina N.V., Pugachev A.A. Simulation of the "Synchronous Generator – Frequency Converter – Synchronous Motor" System. Automation and Modelling in Design and Management. 2023;3:89-96.
2. Andrianov A.I. Calculation of Optimal Control System Parameters for Nonlinear Dynamic Processes of Pulse Voltage Converters. Automation and Modelling in Design and Management. 2022;4:87-96.
3. Bepalov A.V., Geraskin A.A., Smirnov D.O. Certification as a Tool for Securing a Trust. Nanoindustry. 2023;16(S9-1(119):206-208.
4. Gorbunov M.S. Platform Solutions for the Design and Development of Reliable Trusted Electronic Components. IT Security (Russia). 2022;29(2):85-99.
5. Shindo D., Oikawa T. Analytical Transmission Electron Microscopy. Moscow: Tekhnosfera; 2006.

6. Миронов В.Л. Основы сканирующей зондовой микроскопии. – Нижний Новгород: РАН ИФМ, 2004. – 114 с.

7. Булатов А.Н., Неволин В.К. Анодное окисление тонких пленок алюминия в атомно-силовом микроскопе // Микросистемная техника. – 2003. – № 11. – с. 42-44.

8. Гусев А.И. Наноматериалы, наноструктуры, нанотехнологии. – М.: Физматлит, 2005. – 414 с.

9. Неволин В.К. Зондовые нанотехнологии в электронике. – М.: Техносфера, 2005. – 152 с.

10. Feenstra R.M., et al. Recent Development in Scanning Tunneling Spectroscopy of Semiconductor Surfaces. Appl. Phys., 2001.

11. Рыков С.А. Сканирующая зондовая микроскопия полупроводниковых материалов и наноструктур. – СПб: Наука, 2001. – 52 с.

12. Sakurai T. Advances in Scanning Probe Microscopy. Springer Science & Business Media, 2012.

13. Бахтизин Р.З., Галлямов Р.Р. Физические основы сканирующей зондовой микроскопии, Уфа, РИО БашГУ. – 2003. – 82 с.

6. Mironov V.L. Fundamentals of Scanning Probe Microscopy. Nizhny Novgorod: IPM RAS; 2004.

7. Bulatov A.N., Nevolin V.K. Anodic Oxidation of Thin Aluminium Films in an Atomic Force Microscope. Microsystems Technology. 2003;11:42-44.

8. Gusev A.I. Nanomaterials, Nanostructures, Nanotechnologies. Moscow: Fizmatlit; 2005.

9. Nevolin V.K. Probe Nanotechnologies in Electronics. Moscow: Tekhnosfera; 2005.

10. Feenstra RM, et al. Recent Development in Scanning Tunneling Spectroscopy of Semiconductor Surfaces. Applied Physics. 2001.

11. Rykov S.A. Scanning Probe Microscopy of Semiconductor Materials and Nanostructures. Saint Petersburg: Nauka; 2001.

12. Sakurai T. Advances in Scanning Probe Microscopy. Springer Science & Business Media; 2012.

13. Bakhtizin R.Z., Gallyamov R.R. Physical Foundations of Scanning Probe Microscopy. Ufa: Publishing House of Bashkir State University; 2003.

Информация об авторах:

Малаханов Алексей Алексеевич

кандидат технических наук, доцент, руководитель учебного дизайн-центра «Разработка, испытания и реверс-инжиниринг электронной компонентной базы», заведующий кафедрой «Электронные, радиоэлектронные и электротехнические системы» Брянского государственного технического университета

Пугачев Александр Анатольевич

доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Турбиностроение, электро- и теплоэнергетика» Брянского государственного технического университета.

Маркова Валерия Константиновна

стажер учебного дизайн-центра «Разработка, испытания и реверс инжиниринг электронной компонентной базы», студент Брянского государственного технического университета

Information about the authors:

Malakhanov Aleksey Alekseevich

Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Head of the Educational Design Centre of Development, Testing and Reverse Engineering of Electronic Component Base, Head of the Department of Electronic, Radio-Electronic and Electrical Engineering Systems of Bryansk State Technical University

Pugachev Alexander Anatolyevich

Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of the Department of Turbine Engineering, Electrical and Thermal Engineering of Bryansk State Technical University

Markova Valeria Konstantinovna

Intern at the Educational Design Centre of Development, Testing and Reverse Engineering of Electronic Component Base, student of Bryansk State Technical University

**Вклад авторов: все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.
Contribution of the authors: the authors contributed equally to this article.**

**Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.
The authors declare no conflicts of interests.**

Статья поступила в редакцию 10.07.2024; одобрена после рецензирования 31.07.2024; принята к публикации 14.08.2024.

The article was submitted 10.07.2024; approved after reviewing 31.07.2024; accepted for publication 14.08.2024.

Рецензент – Федяева Г.А., доктор технических наук, доцент, Брянский государственный технический университет.

Reviewer – Fedyeva G.A., Doctor of Technical Sciences, Associate Professor, Bryansk State Technical University.