

DOI: 10.21122/2220-9506-2024-15-2-104-109

Энергодисперсионный рентгеновский микроанализ – как метод исследования границы раздела алюминий-поликремний после воздействия длительного и быстрого термических отжигов

В.А. Пилипенко, Н.С. Ковальчук, Д.В. Шестовский, Д.В. Жигулин

ОАО «ИНТЕГРАЛ» – управляющая компания холдинга «ИНТЕГРАЛ»,
ул. Казинца, 121А, г. Минск 220108, Беларусь

Поступила 04.04.2024

Принята к печати 27.05.2024

Энергодисперсионный рентгеновский микроанализ является одним из основных методов по определению элементного состава вещества. Обладая высокой локальностью и относительно малой глубиной проникновения электронного луча (<1 мкм), данный метод нашёл широкое применение в области микроэлектроники, как основной метод анализа элементного состава вещества. Метод позволяет исследовать поверхность вещества как точно, так и по площади с построением карт распределения элементов. В работе исследовалось влияние длительной и быстрой термообработок на формирование границы раздела алюминий-поликремний с целью изучения формирования омических контактов в элементной базе интегральных микросхем. Исследование границы раздела алюминий-поликремний осуществлялось методом энергодисперсионного рентгеновского микроанализа. Установлено, что при длительном термическом отжиге (450 °С, 20 мин) поликремний полностью растворяется в алюминии с последующей его сегрегацией в виде отдельных агломератов в плёнке алюминия, что может привести к полному отказу работоспособности интегральной микросхемы. При быстром термическом отжиге (450 °С, 7 с) такого явления не обнаружено. Таким образом, быстрый термический отжиг целесообразно использовать в качестве альтернативной замены традиционного длительного термического отжига в микроэлектронике. Такая замена позволяет существенно уменьшить растворение поликремния в алюминии, избежать разрушения омических контактов и поднять процент выхода годных изделий в процессе изготовления интегральных микросхем.

Ключевые слова: омический контакт, интегральная микросхема, граница раздела алюминий-поликремний, быстрая термообработка

Адрес для переписки:

Жигулин Д.И.
ОАО «ИНТЕГРАЛ» – управляющая компания холдинга
«ИНТЕГРАЛ»,
ул. Казинца, 121А, г. Минск 220108, Беларусь
e-mail: zhygulin@mail.ru

Address for correspondence:

Zhyhulin D.V.
JSC "Integral" – "Integral" Holding Management Company,
Kazincin str., 121A, Minsk 220108, Belarus
e-mail: zhygulin@mail.ru

Для цитирования:

В.А. Пилипенко, Н.С. Ковальчук, Д.В. Шестовский, Д.В. Жигулин
Энергодисперсионный рентгеновский микроанализ – как метод
исследования границы раздела алюминий-поликремний после
воздействия длительного и быстрого термических отжигов.
Приборы и методы измерений.
2024. Т. 15. № 2. С. 104–109.
DOI: 10.21122/2220-9506-2024-15-2-104-109

For citation:

Pilipenko U.A., Kovalchuk N.S., Shestovski D.V., Zhyhulin D.V.
Energy-Dispersive X-Ray Microanalysis – as a Method for Study
the Aluminium-Polysilicon Interface after Exposure to Long-Term
and Rapid Thermal Annealing.
Devices and Methods of Measurements.
2024;15(2):104–109. (In Russ.).
DOI: 10.21122/2220-9506-2024-15-2-104-109

DOI: 10.21122/2220-9506-2024-15-2-104-109

Energy-Dispersive X-Ray Microanalysis – as a Method for Study the Aluminium-Polysilicon Interface after Exposure with Long-Term and Rapid Thermal Annealing

U.A. Pilipenko, N.S. Kovalchuk, D.V. Shestovski, D.V. Zhyhulin

JSC "Integral" – "Integral" Holding Management Company,
Kazinka str., 121A, Minsk 220108, Belarus

Received 04.04.2024

Accepted for publication 27.05.2024

Abstract

Energy dispersive X-ray microanalysis is one of the main methods for determining the elemental composition of matter. Possessing high locality and a relatively shallow penetration depth of the electron beam ($<1 \mu\text{m}$), this method has found wide application in the field of microelectronics, as the main method for analyzing the elemental composition of matter. The method allows to study the surface of a substance both pointwise and over an area with the construction of element distribution maps. In the paper we investigated the influence of long-term and rapid heat treatments on the formation of the aluminum-polysilicon interface in order to study the formation of ohmic contacts in the element base of integrated circuits. The aluminum-polysilicon interface was studied using energy-dispersive X-ray microanalysis. It has been established that during long-term thermal annealing (450 °C, 20 min) polysilicon is completely dissolved in aluminum followed by its segregation in the form of separate agglomerates in the aluminum film, which can lead to a complete failure of the integrated circuit. During rapid thermal annealing (450 °C, 7 s) such a phenomenon was not detected. Thus it is advisable to use rapid thermal annealing as an alternative to traditional long-term thermal annealing in microelectronics. This makes it possible to significantly reduce the dissolution of polysilicon in aluminum, avoid the destruction of ohmic contacts and increase the percentage of yield of workable products in the process of integrated circuits' manufacturing.

Keywords: ohmic contact, integrated circuit, aluminum-polysilicon interface, rapid thermal processing

Адрес для переписки:

Жигулин Д.И.
ОАО «ИНТЕГРАЛ» – управляющая компания холдинга
«ИНТЕГРАЛ»,
ул. Казинца, 121А, г. Минск 220108, Беларусь
e-mail: zhygulin@mail.ru

Address for correspondence:

Zhyhulin D.V.
JSC "Integral" – "Integral" Holding Management Company,
Kazinka str., 121A, Minsk 220108, Belarus
e-mail: zhygulin@mail.ru

Для цитирования:

В.А. Пилипенко, Н.С. Ковальчук, Д.В. Шестовский, Д.В. Жигулин
Энергодисперсионный рентгеновский микроанализ – как метод
исследования границы раздела алюминий-поликремний после
воздействия длительного и быстрого термических отжигов.
Приборы и методы измерений.
2024. Т. 15. № 2. С. 104–109.
DOI: 10.21122/2220-9506-2024-15-2-104-109

For citation:

Pilipenko UA, Kovalchuk NS, Shestovski DV, Zhyhulin DV.
Energy-Dispersive X-Ray Microanalysis – as a Method for Study
the Aluminium-Polysilicon Interface after Exposure to Long-Term
and Rapid Thermal Annealing.
Devices and Methods of Measurements.
2024;15(2):104–109. (In Russ.).
DOI: 10.21122/2220-9506-2024-15-2-104-109

Введение

При усиливающейся тенденции уменьшения проектных норм изготовления интегральных микросхем всё большее значение приобретает снижение термического воздействия в технологическом процессе их изготовления [1–4]. Такая тенденция связана со значительным уменьшением длительности диффузионных процессов, которая характерна при высокотемпературных термообработках [5]. Особенно остро этот вопрос стоит при формировании омических контактов к кремнию и поликремнию (ПКК). Это обусловлено тем, что при длительной термообработке (450 °С, 20 мин) происходит интенсивное взаимодействие ПКК с алюминием, и образованию конгломератов ПКК в алюминии, что приводит к увеличению контактного сопротивления контакта, а, значит, к изменению вольт-амперных характеристик транзистора. Кроме того, образовавшиеся остроугольные конгломераты ПКК могут привести к утечкам или к короткому замыканию между топологическими слоями интегральных микросхем. В качестве альтернативы длительной термической обработке всё чаще применяется быстрая термообработка (БТО) (450 °С, 7 с), при которой взаимодиффузия алюминия и ПКК находится на стадии, позволяющей сформироваться омическому контакту без образования конгломератов ПКК [6–8]. Заметим, что в литературе имеется большое количество данных посвящённых механизму взаимодействия алюминий-кремний и алюминий-алюминий, а по механизму взаимодействия алюминий-ПКК такие данные практически отсутствуют.

Методика эксперимента

На кремниевых пластинах КДБ 10 пирогенным окислением при температуре 850 °С формировался окисел кремния. Затем на окисле кремния методом газофазного осаждения формировался ПКК толщиной 0,4 мкм, на поверхность которого магнетронным распылением наносилась плёнка алюминия (с 1 % примеси Si), толщиной 3 мкм. Полученные структуры Al-ПКК-SiO₂ подвергались различным термообработкам: длительной термической

обработке (450 °С, 20 мин, N₂) и БТО (450 °С, 7 с, Ar). Процесс БТО пластин выполнялся в атмосфере аргона при атмосферном давлении на установке УБТО ПИТ 1801. Атмосфера аргона выбрана для исключения окисления алюминия при термообработке. Пластины облучались с непланарной стороны галогенными лампами длительностью 7 с.

Исследование границы раздела Al-ПКК и определение элементного состава [9–10] осуществлялось на сколе пластины с помощью растрового электронного микроскопа (РЭМ) S-4800 фирмы Hitachi (Япония) с энергодисперсионным спектрометром Quantax 200 фирмы Bruker (Германия). Профили распределения элементов снимались при ускоряющем напряжении 5 кВ, что соответствует глубине анализа не более 0,35 мкм.

Результаты и их обсуждение

На рисунке 1а приведена РЭМ фотография поперечного сечения структуры Al-ПКК-SiO₂ без термического воздействия. На ней отчётливо виден ПКК толщиной 0,4 мкм, и алюминий, равномерно лежащий на ПКК. На рисунке 1б приведены профили распределения алюминия, кремния и кислорода по глубине залегания слоёв. Точка пересечения алюминия и кремния совпадает с началом концентрационного максимума кислорода. Это указывает на то, что между алюминием и окислом кремния лежит ПКК с чёткой неразмытой границей.

На рисунке 2а приведена РЭМ фотография поперечного сечения структуры Al-ПКК-SiO₂ после БТО (450 °С, 7 с). На ней виден ПКК толщиной ≈0,35 мкм, и равномерно лежащий алюминий без видимых включений. Таким образом, толщина ПКК после БТО уменьшилась на ≈50 нм по сравнению с исходной структурой, без термической обработки.

Аналогичные результаты получены методом энергодисперсионного микроанализа путём сравнения кривых распределения Al, Si и O в структуре Al-ПКК-SiO₂. На рисунке 1б видно, что точка пересечения кривых Al и Si лежит в пределах 2,04 мкм. На рисунке 2б она соответствует 2,10 мкм. Разница между точками составляет ≈60 нм, что хорошо коррелирует с данными, полученными по РЭМ фотографиям сколов.

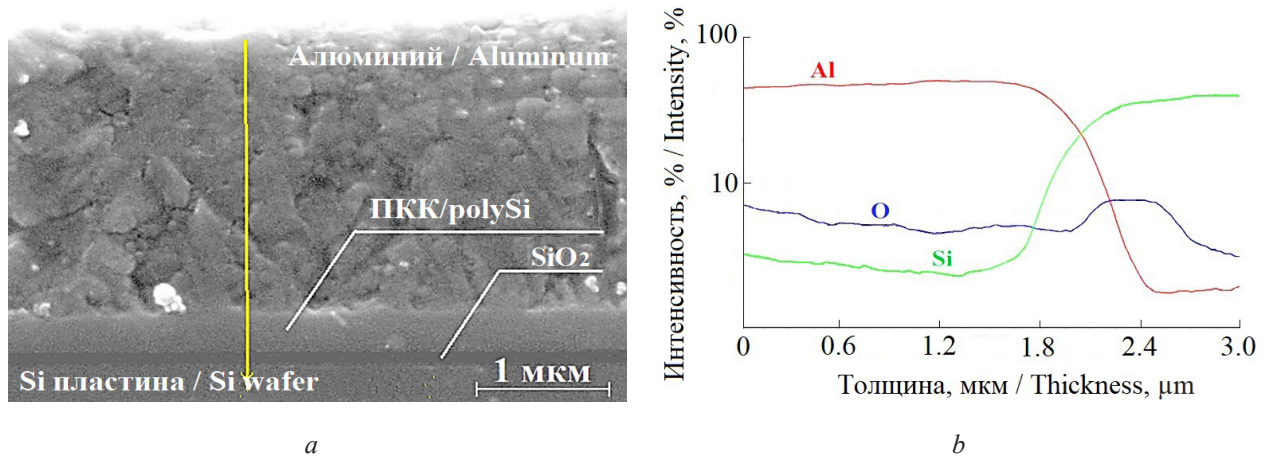


Рисунок 1 – РЭМ изображение поперечного сечения структуры Al-ПКК-SiO₂ без термической обработки (a) с распределением Al, Si, O вдоль линии сканирования (b)

Figure 1 – SEM image of the cross section of the Al-polySi-SiO₂ structure without heat treatment (a) with Al, Si, O distribution along the scanning line (b)

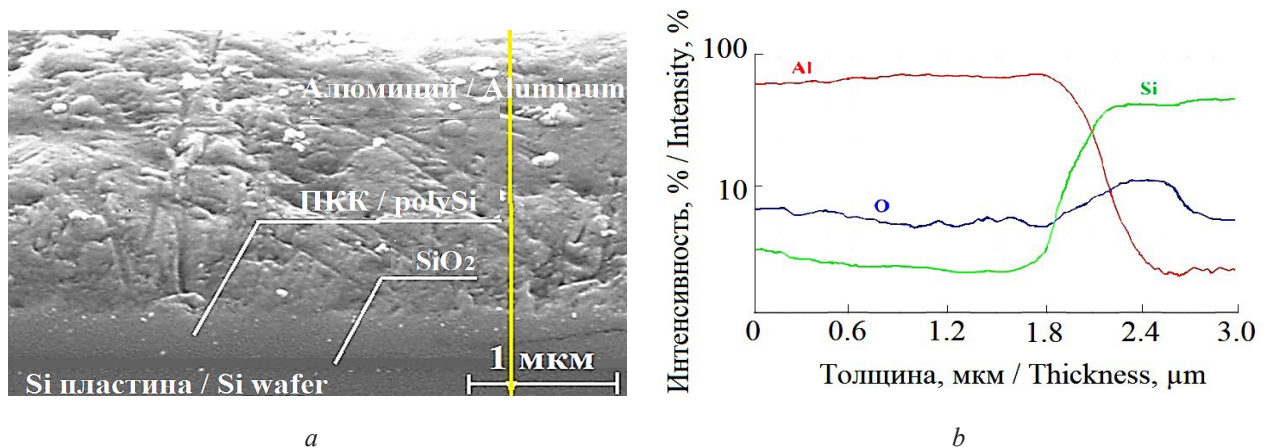


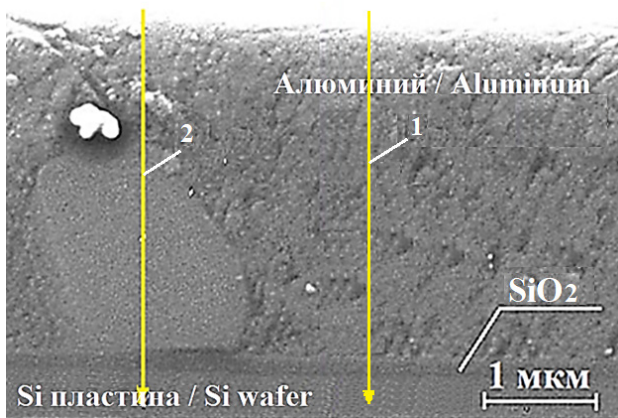
Рисунок 2 – РЭМ изображение поперечного сечения структуры Al-ПКК-SiO₂ после быстрой термообработки (a) с распределением Al, Si, O вдоль линии сканирования (b)

Figure 2 – SEM image of the cross section of the Al-polySi-SiO₂ structure after rapid heat treatments (a) with Al, Si, O distribution along the scanning line (b)

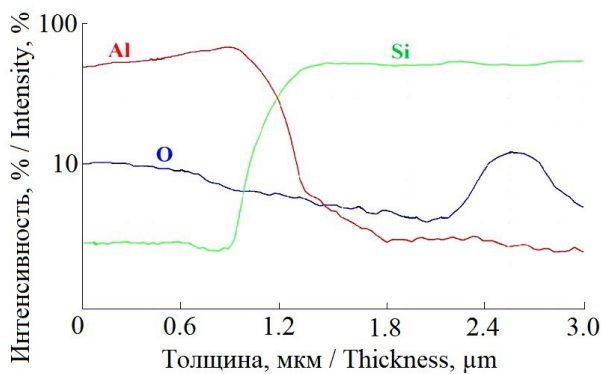
Таким образом, при формировании омического контакта с помощью БТО происходит незначительное растворения кремния в алюминии без образования в нём конгломератов ПКК, что связано с незначительными диффузионными процессами между алюминием и ПКК.

На рисунке 3a приведена РЭМ фотография поперечного сечения структуры Al-ПКК-SiO₂ после длительной термической обработки (450 °С, 20 мин). На ней видно, что ПКК

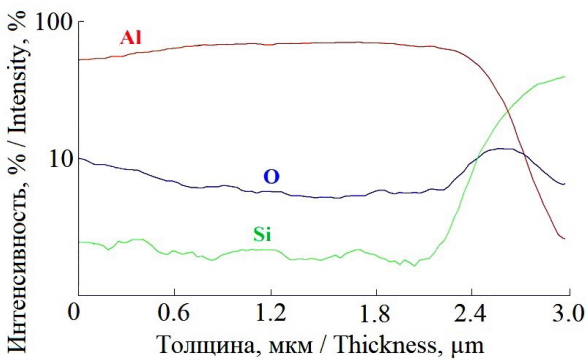
полностью растворился в алюминии. Это также подтверждается методом энергодисперсионного микроанализа (рисунок 3b, линия 1). Анализ кривых распределения Al, Si и O (рисунок 3c, линия 2) показал, что появившиеся конгломераты представляют собой поликристаллический кремний, которые образовались в результате полного его растворения в алюминии. С понижением температуры, растворенный ПКК выделяется в виде отдельных крупных остроугольных конгломератов (рисунок 3a).



a



b



c

Рисунок 3 – РЭМ изображение поперечного сечения структуры Al-ПКК-SiO₂ после длительной термической обработки (a) с распределением Al, Si, O вдоль линии сканирования 2 (b) и линии сканирования 1 (c)

Figure 3 – SEM image of the cross section of the Al-polySi-SiO₂ structure after long heat treatments (a) with Al, Si, O distribution along the scanning line 2 (b) and the scanning line 1 (c)

Наличие таких конгломератов в слое алюминия является одной из причин отказов

изделий микроэлектроники, поскольку они своими остроугольными краями могут протыкать и закорачивать соседние топологические слои. Кроме того, их наличие уменьшает проводимость плёнки алюминия, а, значит, увеличивает контактное сопротивление контакта алюминий-кремний и алюминий-ПКК.

Заключение

Методом энергодисперсионного рентгеновского микроанализа исследована граница раздела алюминий-ПКК после воздействия длительного и быстрого термических отжигов. Данный метод анализа позволяет достаточно точно определять элементный состав вещества с построением профиля распределения исследуемых веществ вдоль линии сканирования.

Установлено, что при длительном термическом отжиге (450 °C, 20 мин), вследствие диффузионных процессов, происходит растворение поликремния в алюминии с образованием крупных конгломератов поликремния, что является одной из причин отказов интегральных микросхем. При быстром термическом отжиге (450 °C, 7 с) такой тенденции не наблюдается.

Таким образом, стандартный процесс формирования омических контактов с использованием длительного термического отжига целесообразно использовать при изготовлении изделий с проектными нормами более 1 мкм, например, в силовой микроэлектронике. С уменьшением проектных норм влияние процесса взаимной диффузии на формирование омического контакта значительно усиливается, что обуславливает снижение либо температуры нагрузки, либо времени отжига с применением процесса быстрой термообработки.

Список использованных источников

1. Sze S.M. Semiconductor Devices: Physics and Technology / S.M. Sze, Lee M.K. // New York: John Wiley and Sons Singapore Pte. Limited, 2012.

2. Демидов А.А. Современные и перспективные полупроводниковые материалы для микроэлектроники следующего десятилетия (2020-2030 гг.) / А.А. Демидов, С.Б. Рыбалка // Прикладная математика и физика. 2021. Т. 53, № 1. С. 53–72.

3. Розанов Ю.К. Силовая электроника. Эволюция и применение. М.: Знак, 140, 2018.

4. Гольцова М. Силовая полупроводниковая электроника. Многообещающие технологии становятся реальностью. Электроника НТБ. 4:54-100, 2014.

5. Афонин Н.Н. Модель взаимодиффузии при формировании тонких плёнок металлов на монокристаллическом кремнии в условиях ограниченной растворимости компонентов/Н.Н. Афонин, В.А. Логачева // Конденсированные среды и межфазные границы. 2022. Т. 24, № 1. С. 129–135.

6. Пилипенко В.А. Быстрые термообработки в технологии СБИС / В.А. Пилипенко // Минск: Издательский центр БГУ; 2004.

7. Шугуров А.Р. Механизмы возникновения напряжений в тонких пленках и покрытиях / А.Р. Шугуров, А.В. Панин // Журнал технической физики. 2020. Т. 90, вып. 12. С. 1971–1994.

8. Пилипенко В.А. Влияние длительной и быстрой термообработок на формирование границы раздела алюминий – поликремний / В.А. Пилипенко [и др.] // Журнал Белорусского государственного университета. Физика. 2023. № 2. С. 51–57.

9. Walther T. Measurement of nanometer-scale gate oxide thicknesses by energy-dispersive X-ray spectroscopy in a scanning electron microscope combined with Monte Carlo simulations / T. Walther // Nanomaterials. 2021, vol. 11–2117.

10. Sabu T. Microscopy methods in nanomaterials characterization / T. Sabu [et al.] // Elsevier, 2017.

References

1. Sze SM, Lee MK. Semiconductor Devices: Physics and Technology. New York: John Wiley and Sons Singapore Pte. Limited, 2012.

2. Demidov AA, Rybalka SB. Modern and promising semiconductor materials for microelectronics of the next decade (2020–2030). Applied mathematics and physics. 2021;53(1):53–72. (In Rus.).

3. Rozanov YK. Power electronics. Evolution and Application. M.: Znak, 2018;140.

4. Goltsova M. Power semiconductor electronics. Promising technologies become reality. Electronics Scientific and Technical Library. 2014;4:54-100.

5. Afonin NN, Logachova VA. Model of interdiffusion during the formation of thin films of metals on single-crystalline silicon under conditions of limited solubility of components. Condensed matter and interphase boundaries 2022;24(1):129–135. (In Rus.).

6. Pilipenko VA. Rapid Thermal Processing in VLSI Technology. Minsk, Publishing Center of Belarusian State University. (In Rus.).

7. Shugurov AR, Panin AV. Mechanisms of stress generation in thin films and coatings. Journal of Technical Physics. 2020;90(12):1971–1994. (In Rus.).

8. Pilipenko VA [et al.] The influence of long-term and rapid heat treatments on the formation of the aluminum-polysilicon interface. Journal of the Belarusian State University. Physics. 2023;2:51–57. (In Rus.).

9. Walther T. Measurement of nanometer-scale gate oxide thicknesses by energy-dispersive X-ray spectroscopy in a scanning electron microscope combined with Monte Carlo simulations. Nanomaterials. 2021;(11):2117. (In Rus.).

10. Sabu T, Raju T, Zachariah AK, Mishra RK. Microscopy methods in nanomaterials characterization. Elsevier, 2017.