



<http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2023-21-3-12-16>

Оригинальная статья  
Original paper

УДК 621.3.049.774

## ПАССИВАЦИЯ ТОКОПРОВОДЯЩЕЙ СИСТЕМЫ ИНТЕГРАЛЬНЫХ СХЕМ СЛОЕМ НИТРИДА АЛЮМИНИЯ

В. В. ЕМЕЛЬЯНОВ

Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники  
(г. Минск, Республика Беларусь)

Поступила в редакцию 28.12.2022

© Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, 2023  
Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics, 2023

**Аннотация.** Пассивация пленочной токопроводящей системы интегральных схем делает ее более надежной за счет повышения устойчивости к электромиграции. Рассмотрена задача по изготовлению пассивирующего слоя на сформированной токопроводящей системе интегральной схемы, получаемой в едином технологическом цикле, включающем изотропное плазмохимическое травление слоя сплава алюминия на глубину 8–12 нм и изотропное плазмохимическое азотирование поверхности полученных токоведущих дорожек до достижения толщины нитрида алюминия 10–50 нм. Данная задача позволяет выполнить формирование на кремниевой подложке с активными областями диэлектрической пленки на основе диоксида кремния, травление в диэлектрической пленке контактных окон к активным элементам подложки, осаждение барьерного слоя толщиной 0,005–0,050 мкм, нанесение пленки сплава алюминия толщиной 0,5–2,0 мкм и многое другое.

**Ключевые слова:** интегральные схемы, токопроводящие системы, алюминиевая металлизация, пассивирующий слой, нитрид алюминия.

**Конфликт интересов.** Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

**Для цитирования.** Емельянов, В. В. Пассивация токопроводящей системы интегральных схем слоем нитрида алюминия / В. В. Емельянов // Доклады БГУИР. 2023. Т. 21, № 3. С. 12–16. <http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2023-21-3-12-16>.

## PASSIVATION OF A CONDUCTIVE SYSTEM OF INTEGRATED CIRCUITS WITH A LAYER OF ALUMINUM NITRIDE

VICTOR V. EMEL'YANOV

Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics (Minsk, Republic of Belarus)

Submitted 28.12.2022

**Abstract.** Passivation of the film conductive system of integrated circuits makes it more reliable by increasing the resistance to electromigration. The problem of manufacturing a passivating layer on the formed current-conducting system of an integrated circuit, obtained in a single technological cycle, including isotropic plasma-chemical etching of an aluminum alloy layer to a depth of 8–12 nm and isotropic plasma-chemical nitriding of the surface of the obtained current-carrying tracks until the aluminum nitride thickness from 10 to 50 nm, is considered. This task makes it possible to form a dielectric film based on silicon dioxide on a silicon substrate with active regions, etch contact windows to active elements of the substrate in the dielectric film, deposit a barrier layer 0.005–0.050  $\mu\text{m}$  thick, and deposit an aluminum alloy film 0.5–2.0  $\mu\text{m}$  and much more.

**Keywords:** integrated circuits, conductive systems, aluminum metallization, passivation layer, aluminum nitride.

**Conflict of interests.** The author declares no conflict of interests.

**For citation.** Emelyanov V. V. (2023) Passivation of a Conductive System of Integrated Circuits with a Layer of Aluminum Nitride. *Doklady BGUIR*. 21 (3), 12–16. <http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2023-21-3-12-16> (in Russian).

## Введение

Задачей исследований являлось улучшение надежности пленочной токопроводящей системы за счет повышения ее устойчивости к электромиграции. Процесс массопереноса протекает преимущественно вблизи поверхности металлической пленки как наиболее дефектной области. Это объясняется свойствами непосредственно поверхности металла и контактирующими слоями с разными физическими характеристиками. Известно также, что формирование диэлектрических пленок на поверхности алюминия, в частности диоксида или нитрида кремния, существенно снижает скорость массопереноса. Данный факт объясняется пассивацией несвязанных электронов приповерхностных атомов алюминия, что уменьшает их электрическую активность и диффузионную подвижность. Однако в связи с тем, что формирование высокостабильных приборов предполагает, как правило, длительную (4–6 ч и более) термическую обработку готовых структур в целом, а алюминий является химически активным элементом, контакт алюминия с диэлектриком, например диоксидом кремния, приводит к раскислению последнего с образованием свободного кремния и оксида алюминия. Высвободившийся кремний растворяется в слое сплава алюминия, способствует формированию новых точечных дефектов, а образовавшийся оксид алюминия является центром зарождения новых дефектов типа алюмосиликатов за счет его взаимодействия с диоксидом кремния. Кроме того, оксид алюминия – это соединение с ионным типом химической связи, что способствует его участию в массопереносе за счет обменных процессов по типу  $2Al^* + Al_2O_3 = 2Al + Al^*_2O_3$ , когда металл и его оксид обмениваются атомами. Оба этих фактора приводят к снижению стабильности и надежности токопроводящих систем с диэлектрическими пассивирующими слоями. Высокая жесткость диэлектрических пленок способствует возникновению в них больших остаточных напряжений и усилению генерации точечных дефектов.

Наличие нитрида алюминия на поверхности токоведущих дорожек из сплава алюминия исключает взаимодействие между алюминием и диоксидом кремния. Нитрид алюминия химически очень инертен и не взаимодействует с диоксидом кремния. С алюминием возможен обмен атомами металла, что, однако, не приводит к каким-либо изменениям концентрации точечных дефектов. Атомы металла могут только отдавать электроны, в результате чего заряжаются положительно. Миграция положительных ионов металла по границе раздела «алюминий – нитрид алюминия» значительно затруднена вследствие наличия у азота дополнительной пары электронов, не участвующих в образовании химической связи в нитриде. Это приводит к формированию прочной донорно-акцепторной химической связи между азотом в составе нитрида алюминия и мигрирующим ионом металла. Таким образом, нитрид алюминия является не только хорошим барьером на пути взаимодействия алюминия с диоксидом кремния, но и своеобразным геттером точечных дефектов в слое сплава алюминия.

## Методика формирования токопроводящих систем

Очевидным способом уменьшения растворимости кремния в алюминии является легирование алюминиевой пленки кремнием. Концентрация кремния в алюминии при этом выбирается близкой к составу эвтектики (98,68 % Al + 1,32 % Si). Так, например, известна пленочная токопроводящая система для кремниевых полупроводниковых приборов, представляющая собой пленку алюминия толщиной порядка 1 мкм заданной топологической конфигурации, легированную кремнием до концентрации 1–3 %.

Оценку устойчивости тонких пленок к электромиграции обычно проводят путем измерения времени  $t_p$ , при котором происходит разрыв токоведущей дорожки испытываемой тестовой структуры при повышенных температуре (до 250 °C) и плотности протекающего через структуру тока (около  $10^6$  А·см<sup>-2</sup>). Величина  $t_p$  называется временем разрушения или временем наработки

на отказ. Полученные при испытаниях данные экстраполируют на нормальные условия работы прибора. Математически связь между  $t_p$  и условиями испытаний выражается формулой

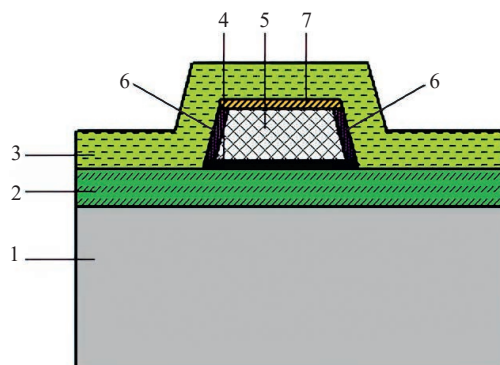
$$\frac{S}{t_p} = Fj^2 \exp\left(-\frac{E_a}{kT}\right), \quad (1)$$

где  $S$  – поперечное сечение проводника;  $F$  – эмпирический коэффициент, зависящий от характеристик токопроводящей системы, удельного сопротивления материала пленки, условий теплоотвода, особенностей тестовой структуры и т. п.;  $j$  – плотность тока через структуру;  $E_a$  – энергия активации процесса электромиграции;  $k$  – постоянная Больцмана;  $T$  – абсолютная температура [1].

Из (1) видно, что при повышении степени интеграции, приводящей к уменьшению площади поперечного сечения проводников  $S$  и возрастанию плотности тока  $j$ , стойкость любой токопроводящей системы к электромиграции снижается. Поэтому прототип характеризуется недостатками, присущими рассмотренным выше техническим решениям, хоть и в меньшей степени. Даже такая токопроводящая система в ряде случаев не удовлетворяет современным требованиям по надежности вследствие неустойчивости к явлениям электромиграции. Резервом надежности системы является увеличение энергии активации  $E_a$  процесса. При повышении  $E_a$  всего на 0,1 эВ надежность токопроводящей системы увеличивается в 55 раз. Величина  $E_a$  зависит как от материала проводника и совершенства его кристаллической структуры, так и от особенностей его взаимодействия с контактирующими слоями.

### Формирование пассивирующего слоя

Задача формирования пассивирующего слоя решается пассивацией всей поверхности токоведущих дорожек слоем нитрида алюминия и созданием за счет этого ловушек для точечных дефектов. Сущность данного решения поясняет рис. 1, где изображено поперечное сечение получаемой токопроводящей системы в составе интегральных схем. Токоведущая дорожка состоит из барьерного слоя, расположенного на поверхности диэлектрика первого уровня, слоя сплава алюминия, расположенного на поверхности барьерного слоя, и слоя нитрида алюминия поверх токоведущей дорожки из слоя сплава алюминия. Слой сплава алюминия в составе токоведущей дорожки защищен от контакта с диэлектриком первого уровня барьерным слоем, а от контакта с диэлектриком второго уровня – слоем нитрида алюминия, расположенным в том числе и на боковых поверхностях токоведущих дорожек [2]. Слой нитрида алюминия выполняет роль барьера между алюминием и диоксидом кремния, предотвращает их химическое взаимодействие и повышает энергию активации электромиграции.



**Рис. 1.** Формирование пассивирующего слоя токопроводящей системы: 1 – полупроводниковая пластина; 2, 3 – диэлектрик первого и второго уровней соответственно; 4 – барьерный слой; 5, 6 – слой сплава алюминия и нитрида алюминия; 7 – нитрид титана

**Fig. 1.** Formation of a passivating layer of a conductive system: 1 – semiconductor wafer; 2, 3 – dielectric of the first and second levels respectively; 4 – barrier layer; 5, 6 – layer of aluminum alloy and aluminum nitride; 7 – titanium nitride

Активные элементы структуры формируют стандартными методами в соответствии с требованиями действующих технических документов. После формирования диэлектрической изоляции первого уровня и вскрытия в ней контактных окон на всю поверхность пластины на установ-

ке напыления типа Endura наносят пленку титана толщиной 20 нм, служащую барьерным слоем, затем пленку сплава алюминия с 0,5 % меди толщиной 0,8 мкм. Стандартными методами фотолитографии формируют рисунок электрической разводки и проводят анизотропное травление слоя сплава алюминия и барьерного слоя титана в анизотропной плазме газовой смеси  $\text{BCl}_3$ ,  $\text{Cl}_2$  и  $\text{N}_2$  при давлении 150–250 мТорр и плотности мощности 1,6–2,2 Вт/см<sup>2</sup>. После этого удаляется фоторезистивная маска и проводится изотропное травление поверхности токоведущих дорожек в хлорсодержащей плазме для удаления образовавшегося оксида алюминия [1]. Затем в том же технологическом цикле проводится откачка продуктов травления, рабочая камера заполняется азотом до давления 220 мТорр и выполняется азотирование поверхности дорожек металлизации в изотропном режиме. Глубину травления и толщину образовавшегося нитрида алюминия определяют по времени обработки для выбранного режима на основании предварительно установленной зависимости по данным электронно-микроскопических исследований.

Далее проводится термообработка структур при 450 °С для получения необходимой кристаллической структуры. Затем формируется пассивирующее покрытие (диэлектрик второго уровня) требуемой топологической конфигурации и выполняется стабилизирующая термообработка при температуре 400 °С в течение 6 ч, после чего осуществляется контроль функционирования. Энергия активации электромиграции определяется по результатам испытаний тестовых структур, изготовленных на основании зависимости  $\ln(S/t_p Fj^2) - 1000/T$  [3]. Результаты испытаний представлены на рис. 2, из которого видно, что система металлизации для интегральных схем обеспечивает аналогичный выход годных кристаллов на операции контроля функционирования и характеризуется более высокой надежностью за счет повышения устойчивости к электромиграции.

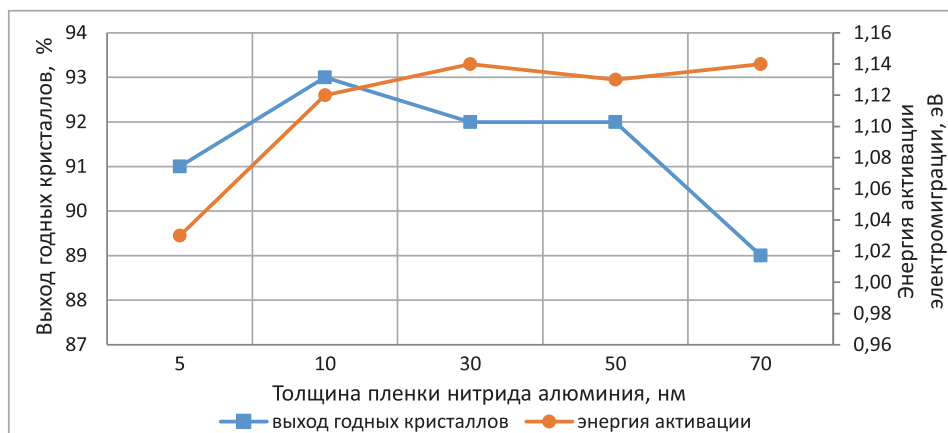


Рис. 2. Зависимость выхода годных кристаллов и энергии активации от толщины пленки нитрида алюминия

Fig. 2. Dependence of the yield of suitable crystals and activation energy on the thickness of the aluminum nitride film

## Выводы

1. Пассивация токопроводящей системы интегральных схем служит для повышения надежности пленочной токопроводящей системы за счет повышения ее устойчивости к электромиграции. Чтобы при данной пассивации выполнить такие задачи, как формирование на кремниевой подложке с активными областями диэлектрической пленки на основе диоксида кремния, травление в диэлектрической пленке контактных окон к активным элементам подложки, осаждение барьерного слоя толщиной 0,005–0,050 мкм, нанесение пленки сплава алюминия толщиной 0,5–2,0 мкм, нанесение фоторезистивной маски методом фотолитографии, анизотропное плазмохимическое травление слоев сплава алюминия и барьерного слоя, удаление фоторезистивной маски с последующей термообработкой для получения требуемой кристаллической структуры металла, необходимо провести изотропное плазмохимическое травление слоя сплава алюминия на глубину 8–12 нм и изотропное плазмохимическое азотирование поверхности полученных токоведущих дорожек до достижения толщины нитрида алюминия 10–50 нм.

2. Сущность технического решения заключается в пассивации всей поверхности токоведущих дорожек слоем нитрида алюминия и создании за счет этого ловушек для точечных дефектов.

### Список литературы

1. Григорьев, Ф. И. Плазмохимическое и ионное химическое травление в технологии микроэлектроники / Ф. И. Григорьев. М.: Моск. госуд. ин-т электроники и матем., 2003. 48 с.
2. Емельянов, В. Повышение устойчивости к стресс-миграции пленочных структур на основе алюминия в микроэлектронике / В. Емельянов // Электроника: Наука, Технология, Бизнес. 2020. № 1. С. 152–159. DOI: 10.22184/1992-4178.2020.192.1.152.159.
3. Микросхемы интегральные. Технические требования к технологическому процессу. Система и методы операционного контроля: Стандарт отрасли ОСТ 1114.1012–99.

### References

1. Grigoriev F. I. (2003) *Plasma-Chemical and Ion-Chemical Etching in Microelectronic Technology*. Moscow, Moscow State Institute of Electronics and Mathematics Publ. 48 (in Russian).
2. Emelyanov V. (2020) Increasing the Resistance to Stress Migration of Film Structures Based on Aluminum in Microelectronics. *Electronics: Science, Technology, Business*. (1), 152–159. DOI: 10.22184/1992-4178.2020.192.1.152.159 (in Russian).
3. Industry Standard OST 1114.1012–99. *Integrated Circuits. Technical Requirements for the Technological Process. System and Methods of Operational Control* (in Russian).

### Сведения об авторе

**Емельянов В. В.**, аспирант кафедры электронной техники и технологии Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники

### Адрес для корреспонденции

220013, Республика Беларусь,  
г. Минск, ул. П. Бровки, 6  
Белорусский государственный университет  
информатики и радиоэлектроники  
Тел.: + 375 29 688-75-76  
E-mail: emeljnov@bk.ru  
Емельянов Виктор Викторович

### Information about the author

**Emelyanov V. V.**, Postgraduate at the Electronic Engineering and Technology Department of the Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics

### Address for correspondence

220013, Republic of Belarus,  
Minsk, P. Brovki St., 6  
Belarusian State University  
of Informatics and Radioelectronics  
Tel.: + 375 29 688-75-76  
E-mail: emeljnov@bk.ru  
Emelyanov Victor Victorovich