



<http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2022-20-7-36-42>

Оригинальная статья / Original paper

УДК 621.3.049.774

## МНОГОСЛОЙНЫЕ СИСТЕМЫ МЕТАЛЛИЗАЦИИ СУБМИКРОННЫХ ИНТЕГРАЛЬНЫХ СХЕМ

В. В. ЕМЕЛЬЯНОВ

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

*Поступила в редакцию 19.07.2022*

© Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, 2022

**Аннотация.** Создание многоуровневой системы межсоединений в субмикронных интегральных схемах позволяет уменьшить электрическое сопротивление токопроводящих дорожек, паразитную емкость между проводниками и ускорить быстродействие приборов микроэлектроники. Предлагается формировать поперечный профиль токоведущих дорожек системы многослойной системы металлизации в форме равнобоковой трапеции с углами при нижнем основании, равными  $75^{\circ}$ – $85^{\circ}$ . Оптимальные углы наклона боковых поверхностей токоведущих дорожек обеспечиваются предлагаемыми режимами плазмохимического травления пленки на основе сплава алюминия. Травление пленки сплава на основе алюминия проводят в плазме газовой смеси  $\text{BCl}_3$ ,  $\text{Cl}_2$  и  $\text{N}_2$  при давлении 150–250 мТорр, плотности мощности 1,6–2,2 Вт/см<sup>2</sup> со следующим содержанием компонентов, об. %:  $\text{BCl}_3$  – 50–65;  $\text{Cl}_2$  – 25–35;  $\text{N}_2$  – остальное.

**Ключевые слова:** субмикронная интегральная схема, многослойная токопроводящая система, алюминиевая металлизация.

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

**Для цитирования.** Емельянов В. В. Многослойные системы металлизации субмикронных интегральных схем. Доклады БГУИР. 2022. 20 (7). С. 36–42.

## MULTILAYER METALLIZATION SYSTEMS OF SUBMICRON INTEGRATED CIRCUITS

VICTOR V. EMEL'YANOV

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

*Submitted 19.07.2022*

© Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics, 2022

**Abstract.** The creation of a multilevel system of interconnections in submicron integrated circuits makes it possible to reduce the electrical resistance of conductive tracks, parasitic capacitance between conductors, and increase the speed of microelectronic devices. It is proposed to form a transverse profile of the current-carrying tracks of a multilayer metallization system in the form of an isosceles trapezoid with angles at the lower base equal to  $75^{\circ}$ – $85^{\circ}$ . Etching of an aluminum-based alloy film is carried out in a plasma gas mixture of  $\text{BCl}_3$ ,  $\text{Cl}_2$ , and  $\text{N}_2$  at the pressure of 150–250 mTorr and power density of 1.6–2.2 W/cm<sup>2</sup>, with the following component content, vol. %:  $\text{BCl}_3$  – 50–65;  $\text{Cl}_2$  – 25–35;  $\text{N}_2$  – the rest.

**Keywords:** submicron integrated circuit, multilayer conductive system, aluminum metallization.

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

**For citation.** Emelyanov V. V. Multilayer Metallization Systems of Submicron Integrated Circuits. Doklady BGUIR. 2022. 20 (7), 36–42.

## Введение

Уменьшение размеров активных элементов субмикронных интегральных схем (ИС) и обусловленное этим повышение степени интеграции привело к тому, что все большая площадь кристалла оказывается занятой электрическими межсоединениями [1]. Увеличение длины межсоединений при одновременном уменьшении их поперечного сечения приводит к значительному повышению электрического сопротивления и емкости, в результате чего сильно ограничивается быстродействие приборов. Одним из возможных решений данной проблемы является создание многоуровневых межсоединений. В свою очередь, многоуровневая система породила множество других проблем, основные из которых – обрыв токоведущих дорожек и нарушение сплошности диэлектрических пленок на ступеньках топологического рельефа. В связи с этим значительные усилия исследователей направлены на планаризацию топологического микрорельефа ИС.

Уменьшение топологических размеров элементов полупроводниковых приборов и рост степени интеграции ИС, в том числе с целью экономии площади кристаллов на пластинах монокристаллического кремния, приводят к значительному увеличению в применяемых в приборах металлических пленках градиентов механических напряжений. Релаксация механических напряжений в таких многослойных структурах протекает преимущественно через изменение размера зерна металлической пленки, сопровождаемое стресс-миграцией атомов алюминия (массоперенос материала пленки под действием механических напряжений) [2]. Наличие развитого рельефа ИС способствует увеличению градиентов механических напряжений и усилению стресс-миграции в системах межсоединений. Это приводит к возникновению дефектов металлической пленки в виде аномально больших зерен и полостей, являющихся причиной коротких замыканий и обрывов и в итоге отказов функционирования ИС [3]. В современных ИС в качестве диэлектрических слоев наиболее широко применяются неорганические пленки на основе диоксида кремния, формируемые из газовой фазы. Для межуровневой диэлектрической изоляции при этом преимущественно используются оплаваемые стекла, в частности, фосфоросиликатное стекло (ФСС), боросиликатное стекло (БСС) или борофосфоросиликатное стекло (БФСС), которые наряду с планаризацией микрорельефа за счет оплавления служат также хорошими ловушками для щелочных и щелочноземельных металлов.

Использование газофазного осаждения пленки на основе диоксида кремния (в данном случае – плазмохимического осаждения) позволяет наиболее полно заполнить топологический микрорельеф между дорожками металлизации [4]. В статье рассмотрено формирование поперечного профиля токоведущих дорожек системы многослойной системы металлизации в форме равнобокой трапеции с углами при нижнем основании, равными  $75^{\circ}$ – $85^{\circ}$ . Оптимальные углы наклона боковых поверхностей токоведущих дорожек обеспечиваются предлагаемыми режимами плазмохимического травления пленки на основе сплава алюминия. Травление пленки сплава на основе алюминия проводят в плазме газовой смеси  $BCl_3$ ,  $Cl_2$  и  $N_2$  при давлении 150–250 мТорр и плотности мощности 1,6–2,2 Вт/см<sup>2</sup>.

## Методика травления пленки алюминия

Для обеспечения субмикронных проектных норм в производстве интегральных схем формирование поперечного профиля токоведущих дорожек проводили в форме равнобокой трапеции с углами при нижнем основании, равными  $75^{\circ}$ – $85^{\circ}$ . Это способствует устранению эффекта экранирования при последующем осаждении диэлектрика, предотвращению его преимущественного роста в верхней части канавок между дорожками и полному заполнению

углублений топологического рельефа материалом диэлектрика и далее материалом последующего слоя.

Выбор угла наклона боковых стенок токоведущих дорожек основан как на устранении эффекта экранирования, так и на минимизации полезной площади, занимаемой металлизацией. При углах наклона более  $85^\circ$ , например  $88^\circ$ , вследствие неперпендикулярности потока осаждаемых частиц диэлектрика рабочей поверхности полупроводниковой пластины наблюдается появление отдельных полостей в диэлектрике. Углы наклона менее  $75^\circ$ , например  $65^\circ$ , требуют уже заметного увеличения площади металлизации без снижения ее электрического сопротивления, что является нерациональным.

Травление пленки сплава на основе алюминия в предлагаемых режимах обеспечивает формирование поперечного профиля токоведущих дорожек в форме равнобокой трапеции, нижнее основание которой немного больше верхнего, а прилегающие углы при нижнем основании этой трапеции являются острыми и составляют упомянутые  $75^\circ$ – $85^\circ$ . Такой профиль травления принято считать положительным.

Установленные оптимальные углы наклона боковых поверхностей токоведущих дорожек обеспечиваются предлагаемыми режимами плазмохимического травления пленки на основе сплава алюминия. Хлор является основным реагентом, обеспечивающим травление алюминия с образованием летучего хлорида алюминия. Однако в связи с тем, что алюминий всегда оказывается защищенным тонкой пленкой собственного оксида, для разрушения последнего используют хлорид бора. Азот в составе газовой смеси играет роль разбавителя для обеспечения требуемой концентрации активных ионов и радикалов при их заданной энергии. Если для травления используется минимальное значение давления газовой смеси, то азот может быть исключен из рабочей атмосферы. Содержание  $\text{BCl}_3$  в этом случае составляет 65 об.%, а  $\text{Cl}_2$  – 35 об.%. Однако при повышении давления даже до 200 мТорр содержание азота должно быть увеличено хотя бы до 5 об.% за счет пропорционального уменьшения содержания  $\text{BCl}_3$  и  $\text{Cl}_2$ , в противном случае возникает риск появления растратов металлизации. В зависимости от особенностей топологического рисунка металлизации в ряде случаев управление скоростью его травления достигается добавлением до 30 об.% азота, регулирующего концентрацию активных радикалов плазмы.

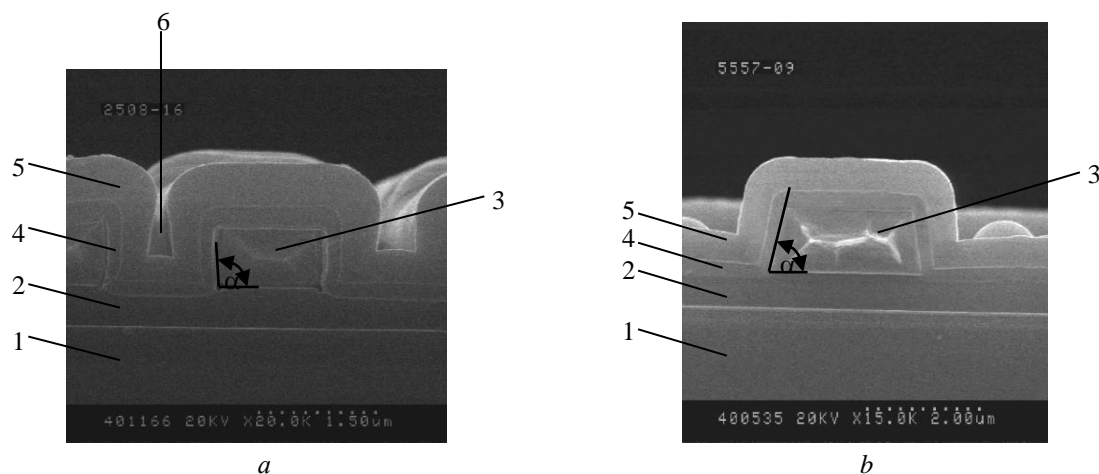
Выбор плотности мощности плазмы и рабочего давления в камере основан на экспериментальных данных [5]. При плотности мощности менее  $1,6 \text{ Вт/см}^2$  существенно снижаются анизотропия процесса и скорость травления до уровня, менее технологически допустимого. Увеличение же плотности мощности более  $2,2 \text{ Вт/см}^2$  приводит к повышению скорости травления защитной маски фоторезиста без сопутствующего повышения скорости травления алюминия, т. е. к снижению селективности и искажению формируемого топологического рисунка. Рабочее давление выбирают в каждом конкретном случае отдельно в зависимости от состава газовой смеси и электрических характеристик разряда.

На рис. 1, а показано поперечное сечение токопроводящей системы первого уровня в составе ИС, полученной по существующей технологии, на рис. 1, б – по предлагаемой технологии. Из приведенных фото видно, что на поверхности полупроводниковой пластины с активными элементами 1 последовательно сформированы первый уровень диэлектрика 2, первый уровень разводки, представленный дорожками металлизации первого уровня 3, второй уровень диэлектрика, образованный первым слоем второго уровня диэлектрика 4, выполненным из пиролитического среднетемпературного диоксида кремния (СТО), и вторым слоем второго уровня диэлектрика 5, выполненным из плазмохимического диоксида кремния (ПХО).

Вследствие эффекта экранирования при формировании системы металлизации по способу-прототипу второй слой второго уровня диэлектрика 5 над канавкой между дорожками металлизации первого уровня 3 практически смыкается с образованием скрытой полости 6. При напылении слоя металла для формирования металлизации второго уровня в таких местах образуются дефекты пленки металла 7 (рис. 2).

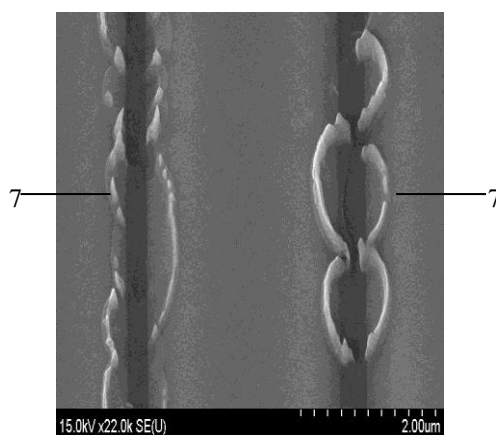
Выбор угла наклона боковых стенок дорожек металлизации  $\alpha$  из интервала  $75^\circ$ – $85^\circ$ , формируемого за счет заявляемых режимов плазмохимического травления сплава на основе алюминия, обеспечивает отсутствие в системе металлизации скрытых полостей и, соответственно, возникающих по этой причине дефектов пленки металла, приводящих к браку.

Таким образом, при использовании предлагаемой технологии изготовления системы металлизации ИС ее качество улучшается за счет предупреждения образования дефектов, а выход годных приборов увеличивается.



**Рис. 1.** РЭМ-фото поперечного сечения токопроводящей системы первого уровня в составе интегральной схемы, полученной по существующей (а) и предлагаемой (б) технологии: 1 – полупроводниковая пластина с активными элементами; 2 – первый уровень диэлектрика; 3 – дорожки металлизации первого уровня; 4 – первый слой второго уровня диэлектрика; 5 – второй слой второго уровня диэлектрика; 6 – скрытая полость;  $\alpha$  – угол наклона боковых стенок дорожек металлизации

**Fig. 1.** SEM photo of the cross-section of the current-carrying system of the first level as part of an integrated circuit, obtained using the existing (a) and proposed (b) technology: 1 – semiconductor wafer with active elements; 2 – the first level of the dielectric; 3 – metallization tracks of the first level; 4 – the first layer of the second level of the dielectric; 5 – the second layer of the second level of the dielectric; 6 – hidden cavity;  $\alpha$  – angle of inclination of the side walls of the metallization tracks



**Рис. 2.** РЭМ-фото дефектов поверхности пленки металла (7) второго уровня в структуре, полученной по существующей технологии

**Fig. 2.** SEM photo of defects in the surface of a metal film (7) of the second level in the structure obtained by the existing technology

### Формирование многослойных систем металлизации

Активные элементы структуры ИС формировали стандартными методами в соответствии с требованиями действующей технической документации. После этого на пластинах формировали первый уровень диэлектрика, содержащий слои термического диоксида кремния, нитрида кремния и ПХО суммарной толщиной 0,45 мкм. Затем методом фотолитографии и плазмохимического травления в первом уровне диэлектрика вскрывали контактные окна к активным элементам. После зачистки контактных окон от естественного диоксида кремния для формирования металлизации первого уровня на пластины напыляли

пленку сплава Al + 1 % Si толщиной 0,8 мкм. Стандартными методами фотолитографии формировали фоторезистивную маску и проводили плазмохимическое травление сплава на основе алюминия. Режимы травления и характеристики структур приведены в табл. 1.

**Таблица 1.** Влияние режимов травления сплава на основе алюминия на характеристики структур  
**Table 1.** Influence of etching modes of an aluminum-based alloy on the characteristics of structures

№ п/п / Equential number	Давление в рабочей камере, мТорр / Pressure in the working chamber, mTorr	Плотность мощности, Вт/см <sup>2</sup> / Power density, W/cm <sup>2</sup>	Содержание, об.% / Content, vol.%			Угол наклона боковых стенок токоведущих дорожек, град / Angle of inclination of the side walls of the current-carrying tracks, deg	Выход годных кристаллов, % / Yield of good crystals, %	Примечание / Note
			BCl <sub>3</sub>	Cl <sub>2</sub>	N <sub>2</sub>			
1	120	2,0	55	30	15	70°	81	–
2	150	2,0	55	30	15	75°	89	–
3	200	2,0	55	30	15	80°	92	–
4	250	2,0	55	30	15	85°	91	–
5	300	2,0	55	30	15	88°	69	Дефекты металлизации второго уровня / Metallization defects of the second level
6	200	1,2	55	30	15	73°	73	–
7	200	1,6	55	30	15	80°	91	–
8	200	2,2	55	30	15	80°	92	–
9	200	2,5	55	30	15	87°	74	–
10	200	2,0	45	30	25	85°	45	Невытравлен- ные остатки металла / Uncorroded metal residue
11	200	2,0	50	30	20	85°	93	–
12	200	2,0	65	30	5	80°	92	–
13	200	2,0	70	30	0	70°	70	Растрав слоя металлизации / Rasterization of the metallization layer
14	200	2,0	55	20	25	65°	71	–
15	200	2,0	55	25	20	80°	94	–
16	200	2,0	55	35	10	80°	92	–
17	200	2,0	55	40	5	90°	78	Дефекты металлизации второго уровня / Metallization defects of the second level
18	150	1,6	65	35	0	80°	85	–
19	200	2,0	50	25	25	80°	92	–
20	200	2,0	45	25	30	70°	82	–
21	Существующий процесс / Existing process					90°	76	Дефекты металлизации второго уровня / Metallization defects of the second level

Далее на пластинах формировали следующий уровень диэлектрической изоляции, состоящий из слоев СТО и ПХО суммарной толщиной  $D_2 = 0,9$  мкм. После формирования контактных окон на поверхность пластин напыляли пленку алюминия с добавкой 1 % кремния толщиной 1,4 мкм и создавали фоторезистивную маску второго уровня металлизации. Травление пленки сплава на основе алюминия для получения второго уровня разводки осуществляли в плазме при тех же режимах, что и для металлизации первого уровня. Тестовые структуры, сформированные в одном технологическом цикле с рабочими, после данной операции были переданы для электронно-микроскопических исследований профиля травления. Затем формировали пассивирующее покрытие требуемой топологической конфигурации и проводили термообработку структур при температуре 450 °С в течение 20 мин в атмосфере азота и водорода.

Выполняли контроль функционирования полученных структур. Результаты анализа контроля функционирования токопроводящих структур в табл. 1 показали, что предлагаемая технология изготовления многослойной системы металлизации ИС обеспечивает гораздо больший выход годных приборов за счет повышения качества токопроводящей пленки сплава Al + 1 % Si.

### Заключение

В технологическом процессе изготовления системы металлизации интегральных схем, включающем формирование на полупроводниковой подложке с активными элементами первой межуровневой диэлектрической изоляции требуемой топологической конфигурации, напыление первой пленки сплава на основе алюминия, формирование фоторезистивной маски металлизации первого уровня, травление первой пленки сплава на основе алюминия, удаление фоторезистивной маски, формирование второй межуровневой диэлектрической изоляции требуемой топологической конфигурации, напыление второй пленки сплава на основе алюминия, формирование фоторезистивной маски металлизации второго уровня, травление второй пленки сплава на основе алюминия, удаление фоторезистивной маски, формирование пассивирующего покрытия требуемой топологической конфигурации и термообработку для обеспечения омических контактов между уровнями электрической разводки, травление пленки сплава на основе алюминия проводят в плазме газовой смеси  $BCl_3$ ,  $Cl_2$  и  $N_2$  при давлении 150–250 мТорр, плотности мощности 1,6–2,2 Вт/см<sup>2</sup> со следующим содержанием компонентов, об. %:  $BCl_3$  – 50–65;  $Cl_2$  – 25–35;  $N_2$  – остальное. В результате предлагаемого процесса происходит формирование поперечного профиля токоведущих дорожек в форме равнобокой трапеции с положительным наклоном.

### Список литературы

1. Инновационные технологии и оборудование субмикронной электроники / А. П. Достанко [и др.], под ред. А. П. Достанко. Минск: Беларус. навука, 2020. 260 с.
2. Емельянов, В. В. Повышение устойчивости к стресс-миграции пленочных структур на основе алюминия в микроэлектронике / В. В. Емельянов // Электроника: Наука, Технология, Бизнес. 2020. № 1. С. 152–159.
3. Емельянов, В. В. Многослойные токопроводящие пленки на основе алюминия для полупроводниковых приборов и интегральных микросхем / В. В. Емельянов, В. А. Емельянов, В. В. Баранов // Весці Нацыянальнай акадэміі навук Беларусі. Сер. Фіз.-тэхн. навук. 2020. Т. 65, № 2. С. 170–176.
4. Турцевич, А. С. Формирование из газовой фазы функциональных слоев интегральных микросхем / А. С. Турцевич, В. А. Емельянов. Минск: Интегралполиграф, 2007. 224 с.
5. Григорьев, Ф. И. Плазмохимическое и ионное химическое травление в технологии микроэлектроники / Ф. И. Григорьев. М.: МГИЭИМ, 2003. 48 с.

## References

1. Dostanko A. P. et al. (2020) *Innovative Technologies and Equipment of Submicron Electronics*. Minsk: Belarusian Science Publ. 260 (in Russian).
2. Emelyanov V. V. (2020) Increasing the Resistance to Stress Migration of Film Structures Based on Aluminum in Microelectronics. *Electronics: Science, Technology, Business*. (1), 152–159 (in Russian).
3. Emelyanov V. V., Emelyanov V. A., Baranov V. V. (2020) Multilayer Conductive Films Based on Aluminum for Semiconductor Devices and Integrated Circuits. *Vestsi Natsiyanal'nai Akademii Navuk Belarusi. Ser. Phis.-Techn. Navuk*. 65 (2), 170–176 (in Russian).
4. Turtsevich A. S., Emelyanov V. V. (2007) *Formation of Functional Layers of Integrated Circuits from the Gas Phase*. Minsk, Integralpolygraph Publ. 224 (in Russian).
5. Grigoriev F. I. (2003) *Plasma-Chemical and Ion-Chemical Etching in Microelectronic Technology*. Moskov, MGIEiM Publ. 48 (in Russian).

### Сведения об авторе

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

### Information about the author

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

### 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

### Address for correspondence

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