#### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Показано, что метод магнетронного напыления может быть использован для легирования пленок SnO<sub>2-δ</sub> одновременно несколькими типами магнитных ионов. В пленках обнаружены проявления характерного для разбавленных магнитных полупроводников ферромагнетизма во всем температурном интервале 4–200 К, что обусловлено стимулированием формирования вакансий кислорода с последующим спиновым расщеплением электронных состояний и формированием магнитных поляронов.

### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЕ ССЫЛКИ

- 1. Batzill, M. The surface and materials science of tin oxide / M. Batzill, U. Diebold // Prog. Surf. Sci. 2005. Vol. 79. P. 47–154.
- 2. The role of Co impurities and oxygen vacancies in the ferromagnetism of Co- doped SnO<sub>2</sub>: GGA and GGA+U studies / H. Wang [et al.] // J. Magn. Magn. Mat. 2009. Vol. 321. P. 3114–3119
- Nomuira, K. Magnetic Properties and Oxygen Defects of Dilute Metal Doped Tin Oxide Based Semiconductor / K. Nomuira // Croat. Chem. Acta. – 2015. – Vol. 88, № 4. – P. 579–590.
- Адамчук, Д.В. Управление электрическими и оптическими параметрами активных элементов датчиков влажности на основе пленок оксидов олова переменного состава / Д.В. Адамчук, В.К. Ксеневич // Приборы и методы измерений. – 2019. – Т. 10, № 2. – С. 138–150.
- Nonstoichiometric tin oxide films: study by X-ray diffraction, Raman scattering and electron paramagnetic reso-nance / D.V. Adamchuk, V.K. Ksenevich, N.A. Poklonski, M. Navickas, J. Banys // Lithuanian Journal of Physics. – 2019. – Vol. 59, № 4. – P. 179–187.
- Coey, J.M.D. Oxide Dilute Magnetic Semiconductors—Fact or Fiction? / J.M.D. Coey, S.A. Chambers // MRS Bull. 2011. Vol. 33. P. 1053–1058
- Raman studies of the intermediate tin-oxide phase / B. Eifert [et al.] // Phys. Rev. Mater. 2017. Vol. 1. – P. 014602-1–014602-6.
- The complete Raman spectrum of nanometric SnO2 particles / A. Diéguez [et al.] // J. Appl. Phys. 2001. – Vol. 90. – 1550-1557.
- 9. Wang, B. Growth mechanisms of SnO<sub>2</sub>/Sn nanocables / B. Wang, Y.H. Yang, G.W. Yang // Nanotechnology. 2006. Vol. 17, № 18. P. 4682–4688.
- Rajan, R. Effect of Co3+ substitution on the structural, optical, and room-temperature magnetic properties of SnO2 nanoparticulates / R. Rajan, R. E. Vizhi // J. Mat. Sci.: Mater. Electron. 2021. Vol. 32, № 9. P. 1–9.
- 11. Coey, J.M.D. d<sup>0</sup> ferromagnetism / J.M.D. Coey // Solid State Sci. 2005. Vol. 7, № 6. P. 660-667.
- Coey, J.M.D. Magnetism in d<sup>0</sup> oxides / / J.M.D. Coey // Nature Materials. 2019. Vol. 18, № 8. P. 652–656.)

# МНОГОУРОВНЕВЫЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ МЕЖСОЕДИНЕНИЯ СУБМИКРОННЫХ ИНТЕГРАЛЬНЫХ СХЕМ

### В. В. Емельянов

Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники ул. П. Бровки, 6, 220013 Минск, Беларусь, e-mail: emeljnov@bk.ruu

Формирование поперечного профиля токоведущих дорожек в форме равнобочной трапеции с углами при нижнем основании, равными 75–85°. Это приводит к 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.

*Ключевые слова:* сплав алюминия; интегральная схема; реактивно-ионное травление; плазмохимический окисел; микроэлектроника.

# MULTI-LEVEL ELECTRICAL INTERCONNECTIONS OF SUBMICRONIC INTEGRAL CIRCUITS

## V. V. Emelyanov

Belarusian state university of informatics and radioelectronics, P.Brovka str. 6, 220013 Minsk, Belarus, Corresponding author: V. V. Emelyanov (emeljnov@bk.ru)

Formation of the transverse profile of current-carrying tracks in the form of an isosceles trapezoid with angles at the lower base equal to  $75-85^{\circ}$ . This leads to the elimination of the shielding effect during the subsequent deposition of the dielectric, the prevention of its predominant growth in the upper part of the grooves between the tracks, and the complete filling of the depressions of the topological relief with the dielectric material and then with the material of the next layer.

*Key words*: aluminum alloy; integrated circuit; reactive ion etching; plasma-chemical oxide; microelectronics.

#### введение

В связи с уменьшением размеров активных элементов изделий микроэлектроники и обусловленное этим повышение степени интеграции привело к тому, что все большая площадь кристалла (чипа) оказывается занятой электрическими межсоединениями. Увеличение длины межсоединений при одновременном уменьшении их поперечного сечения приводит к значительному увеличению 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, основной из которых является обрыв токоведущих дорожек и нарушение сплошности диэлектрических пленок на ступеньках топологического рельефа. В связи с этим значительные усилия исследователей и производителей направлены на планаризацию (сглаживание) топологического микрорельефа интегральных схем (ИС).

### МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Для обеспечения субмикронных проектных норм в производстве интегральных схем формирование поперечного профиля токоведущих дорожек происходит в форме равнобочной трапеции с углами при нижнем основании, равными 75–85°. Это приводит к 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, занимае-

мой металлизацией. При углах наклона более 85°, например 88°, вследствие неперпендикулярности потока осаждаемых частиц диэлектрика рабочей поверхности полупроводниковой пластины наблюдается появление отдельных полостей в диэлектрике. Углы наклона менее 75°, например 65°, 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 равнобочной трапеции, нижнее основание которой немного больше верхнего, а прилегающие углы при нижнем основании этой трапеции являются острыми и составляют упомянутые 75–85°. 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 всегла оказывается зашишенным 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 BCl<sub>3</sub> в этом случае составляет 65 об.%, а Cl<sub>2</sub> -35 об.%. Однако при повышении давления даже до 200 мТорр содержание азота не должно быть увеличено хотя бы до 5 об.% за счет пропорционального уменьшения содержания  $BCl_3$  и  $Cl_2$ , в противном случае возникает риск появления растравов 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. При плотности мощности менее 1,6 Bт/см<sup>2</sup> существенно снижается анизотропия процесса и скорость травления до уровня, ниже технологически допустимого. Увеличение же плотности мощности сверх 2,2 Bт/см<sup>2</sup> приводит к повышению скорости травления защитной маски фоторезиста без сопутствующего повышения скорости травления алюминия, т.е. 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 [1].

На рисунке 1, *а* показано поперечное сечение токопроводящей системы первого уровня в составе ИС, полученной по существующей технологии, а на рис. 1,  $\delta$  – по предлагаемой технологии. Из приведенных фото видно, что на поверхности полупроводниковой пластины с активными элементами *l* 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).



РЭМ фото поперечного сечения токопроводящей системы первого уровня в составе ИС, полученной по существующей (a) и по 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, α – угол наклона боковых стенок дорожек металлизации

## РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

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 плазмохимического диоксида кремния 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.[2] Стандартными методами фотолитографии формировали фоторезистивную маску и проводили плазмохимическое травление сплава на основе алюминия. Режимы травления и характеристики структур указаны в таблице.

Далее на пластинах формировали следующий уровень диэлектрической изоляции, состоящий из слоя СТО и слоя 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 формировали 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 °C в течение 20 минут в атмосфере азота и водорода.

№ п/п	Давление в рабочей камере, мТорр	Плотность мощности, Вт/см <sup>2</sup>	Содер- жание BCl <sub>3</sub> , об.%	Содер- жание Сl <sub>2</sub> , об.%	Содержа- ние N <sub>2</sub> , об.%	Угол накло- на боковых стенок токо- ведущих дорожек, град	Выход год- ных кри- сталлов, %	Приме- чание
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 металли- зации 2-го уровня
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	Невы- травлен- ные ос- татки металла
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 металли- зации
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 металли- зации 2-го уровня
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					90	76	Дефекты металли- зации 2-го уровня

Влияние режимов травления сплава на основе алюминия на характеристики структур

Далее проводили контроль функционирования полученных структур. Результаты анализа контроля функционирования токопроводящих структур в таблице показали, что предлагаемая технология изготовления многослойной системы металлизации ИС обеспечивает повышение выхода годных приборов за счет повышения качества токопроводящей пленки сплава Al+1% Si.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

При травлении пленки сплава на основе алюминия в плазме газовой смеси BCl<sub>3</sub>, Cl<sub>2</sub> и N<sub>2</sub> при давлении 150–250 мТорр, плотности мощности 1,6–2,2 Bт/см<sup>2</sup> при следующем содержании компонентов, об.%: BCl<sub>3</sub> 50–65; Cl<sub>2</sub> 25–35; N<sub>2</sub> – остальное, происходит формирование поперечного профиля токоведущих дорожек в форме равнобочной трапеции с углами при нижнем основании, равными 75–85°. Это приводит к 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.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЕ ССЫЛКИ

- 1. Григорьев, Ф.И. Плазмохимическое и ионное химическое травление в технологии микроэлектроники. М.: МГИЭиМ. –2003. 48 с.
- Турцевич, А.С. Формирование из газовой фазы функциональных слоев интегральных микросхем / А.С. Турцевич, В.А. Емельянов. – Минск: Интегралполиграф, 2007. – 224 с.

# КОНТРОЛЬ КАЧЕСТВА ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ МАТЕРИАЛОВ И ПРИБОРНЫХ СТРУКТУР С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ИЗМЕРИТЕЛЬНОЙ УСТАНОВКИ СКАН-2019

А. Л. Жарин<sup>1</sup>, А. К. Тявловский<sup>1</sup>, К. Л. Тявловский<sup>1</sup>, Р. И. Воробей<sup>1</sup>, К. В. Пантелеев<sup>1</sup>, В. А. Микитевич<sup>1</sup>, В. А. Пилипенко<sup>2</sup>, А. Н. Петлицкий<sup>2</sup>

 <sup>1)</sup> Белорусский национальный технический университет, пр. Независимости, 65, 220013 Минск, Беларусь, e-mail: nil\_pt@bntu.by
<sup>2)</sup> ОАО «ИНТЕГРАЛ» - управляющая компания холдинга «ИНТЕГРАЛ», ул. Казинца, 121А, 220108 Минск, Беларусь, e-mail: office@bms.by

Для комплексного контроля и визуализации пространственного распределения дефектов полупроводниковой пластины разработана измерительная установка сканирующей зондовой электрометрии, реализующая режимы сканирующего зонда Кельвина (SKP), поверхностной фотоЭДС (SPV) и барьерной фотоЭДС (JPV). Повторный контроль поверхности рабочих пластин на разных стадиях технологического процесса с использованием нескольких режимов измерения обеспечивает определение типа дефектов и их потенциального источника в технологическом процессе.

*Ключевые слова:* полупроводниковая пластина; дефект; сканирующий зонд Кельвина; поверхностная фотоЭДС; визуализация.