

# Повышение устойчивости к стресс-миграции пленочных структур на основе алюминия в микроэлектронике

В. Емельянов<sup>1</sup>

УДК 621.3.049.774 | ВАК 05.27.01

Уменьшение топологических размеров элементов полупроводниковых приборов и рост степени интеграции интегральных микросхем (ИМС), в том числе с целью экономии площади кристаллов на пластинах монокристаллического кремния, приводит к значительному увеличению в них градиентов механических напряжений. Это связано с тем, что одна и та же величина напряжений, обусловленная различной природой контактирующих материалов и особенностями их формирования, локализуется на меньшей площади. Формирование пассивирующего слоя нитрида титана на слое сплава алюминия способствует снижению остаточных напряжений в структуре и улавливанию мигрирующих атомов алюминия, что существенно повышает устойчивость к стресс-миграции в системе.

**В** структуре современных ИМС наиболее пластичными материалами являются алюминий и его сплавы, используемые для формирования электрических межэлементных соединений и контактирующие, как правило, с упругими слоями на основе диоксида или нитрида кремния [1, 2]. Релаксация механических напряжений в таких многослойных структурах протекает преимущественно через изменение размера зерна металлической пленки, сопровождаемое стресс-миграцией (массоперенос материала пленки под действием механических напряжений) атомов алюминия [3]. Наличие развитого рельефа ИМС 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 конечном итоге, отказов функционирования ИМС.

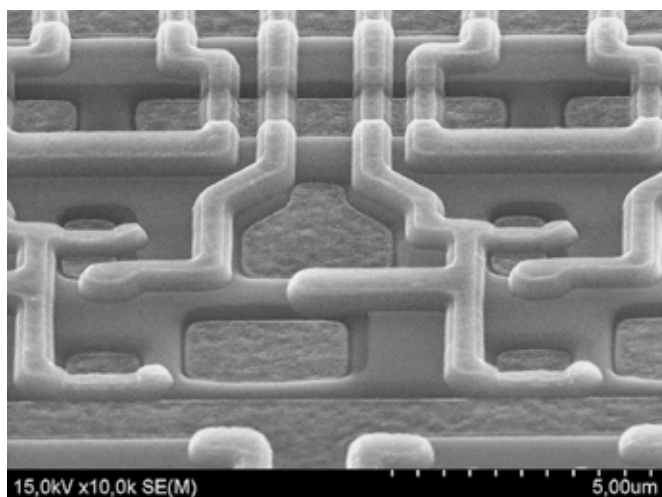
Типовой процесс создания токопроводящих пленок полупроводниковых приборов и ИМС включает формирование на кремниевой подложке с активными областями диэлектрической пленки, преимущественно на основе оксида кремния; формирование в этой пленке контактных окон к активным областям; нанесение пленки алюминия и формирование топологического рисунка. Недостатками такой системы токопроводящих пленок являются высокая взаимная растворимость материала пленки (алюминия) и материала подложки (кремния)

и значительный массоперенос материала пленки под воздействием механических напряжений в процессе изготовления прибора. Это приводит к электрическим замыканиям р-п-переходов, лежащих непосредственно под областью контакта металла с полупроводником, утонению токоведущих дорожек и их разрушению [4].

Наиболее применяемым способом снижения растворимости кремния в пленке алюминия является легирование ее кремнием. Концентрация кремния в алюминии при этом выбирается близкой к составу эвтектики (98,68% Al + 1,32% Si). Технология изготовления таких пленок с использованием сплавов алюминия с добавкой 1–3% кремния практически не отличается от технологии получения пленок чистого алюминия. Единственным отличием такого способа является проведение дополнительной операции по удалению кремниевой крошки с поверхности структур после травления пленки сплава алюминия.

Наличие кремния в пленке алюминия замедляет процесс растворения материала подложки в пленке. Однако такой способ обладает практически теми же недостатками, что и описанная выше типовая технология, хотя и в меньшей степени. Это связано с тем, что процесс растворения кремния в алюминии сопровождается его миграцией по границе раздела «алюминий – диэлектрик», в качестве которого обычно используются пленки фосфоросиликатного стекла (диоксид кремния, легированный фосфором). Кроме того, алюминий хорошо взаимодействует с оксидом фосфора, входящим в состав фосфоросиликатного стекла, что приводит к повышению дефектности границы раздела

<sup>1</sup> ОАО «Интеграл», инженер-технолог, emeljnov@bk.ru.



**Рис. 1.** Фотография участка ИМС с субмикронными проектными нормами, сделанная с помощью растрового электронного микроскопа

металла с диэлектриком вследствие коррозии металла. Это в значительной степени способствует протеканию явлений массопереноса в материале токопроводящей системы. Третьим фактором, ответственным за недостатки рассматриваемой пленочной структуры, является наличие развитого рельефа современных ИМС. Толщина и структура металлизированного покрытия на ступеньках отличается от свойств покрытия на планарных участках. Это приводит к появлению существенных градиентов механических напряжений в кристалле, которые являются движущей силой самодиффузии. Процессы стресс-миграции на этих участках происходят наиболее интенсивно, поэтому разрыв дорожек металлизации происходит преимущественно на ступеньках топологического рельефа [5]. В качестве примера на рис. 1 показана фотография фрагмента ИМС с развитым рельефом поверхности.

Дальнейшим шагом на пути снижения массопереноса в токопроводящих системах ИМС является использование барьерных слоев. В качестве контактных к кремнию слоев для субмикронных ИМС используются силициды переходных металлов, в частности PtSi, но граница раздела между монокристаллическим кремнием и PtSi неоднородна. Для приборов типа диодов Шоттки это имеет принципиальное значение, так как установлено, что при более однородной границе раздела снижается уровень обратных токов в приборе [6].

Известен способ изготовления многослойных металлических пленок кремниевых полупроводниковых приборов, включающий следующие этапы: формирование на кремниевой пластине с активными областями диэлектрической пленки на основе диоксида кремния; формирование в диэлектрической пленке контактных

окон к активным элементам; формирование барьерного слоя толщиной 0,005–0,05 мкм; нанесение пленки сплава алюминия толщиной 0,5–2 мкм; формирование топологического рисунка пленки и последующую термообработку. В качестве барьерного слоя предлагается использовать гидрогенизированный аморфный кремний [7].

Недостатком такого способа является относительно невысокая устойчивость к массопереносу алюминия под действием остаточных механических напряжений в структуре. Проблема осложняется тем, что современные многоуровневые токопроводящие системы характеризуются чрезвычайно малыми размерами и сложной архитектурой. В зависимости от фактической конструкции прибора, формы кристалла и ряда технологических факторов, на одном и том же кристалле могут присутствовать как области сжатия, так и области растяжения. Это приводит к возникновению движущей силы самодиффузии алюминия, образованию дефектов металлической пленки в виде ямок и холмиков и, в результате, к снижению надежности: увеличение размеров этих дефектов сверх размеров токоведущих дорожек приводит к отказу прибора ввиду коротких замыканий либо обрывов. Любые попытки снизить величину остаточных напряжений в целом либо компенсировать их нанесением новых слоев лишь обостряют ситуацию, так как это приводит к дополнительному перераспределению остаточных напряжений по площади кристалла и пластины в целом и возникновению новых областей высоких градиентов напряжений. Данное явление известно как стресс-миграция и описано в [8].

Задачей проведенного исследования является выявление способов повышения качества получаемых токопроводящих пленок за счет повышения их устойчивости к стресс-миграции. Для этого в существующую технологию изготовления пленок для кремниевых полупроводниковых приборов и ИМС, включающую формирование барьерного слоя толщиной 0,005–0,05 мкм, нанесение пленки сплава алюминия толщиной 0,5–2,0 мкм, формирование требуемой топологии и последующую термообработку, вводится еще один этап: после нанесения пленки сплава алюминия на ней формируют пассивирующий слой нитрида титана толщиной 0,02–0,10 мкм, который является ловушкой для мигрирующих атомов алюминия.

Процесс массопереноса под воздействием остаточных напряжений протекает преимущественно вблизи поверхности металлической пленки, поскольку в этой области концентрируется большая часть ее дефектов. Это объясняется как свойствами непосредственно поверхности металла, так и влиянием контактирующих слоев с разными физическими свойствами. 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 снижает 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 полностью сформированных структур, а алюминий является химически достаточно 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, способствуя формированию новых точечных дефектов, а образовавшийся оксид алюминия является центром зарождения новых дефектов типа алюмосиликатов за счет его взаимодействия с диоксидом кремния. К тому же оксид алюминия является соединением с ионным типом химической связи, что способствует его участию в процессах массопереноса за счет обменных процессов по типу  $2Al^+ + Al_2O_3 = 2Al + Al_2O_3$ , когда металл и его оксид обмениваются атомами. Оба этих фактора в данном случае приводят к снижению стабильности и надежности токопроводящих систем с диэлектрическими пассивирующими слоями. Высокая жесткость диэлектрических пленок способствует возникновению в них высоких остаточных напряжений и усилению стресс-миграции.

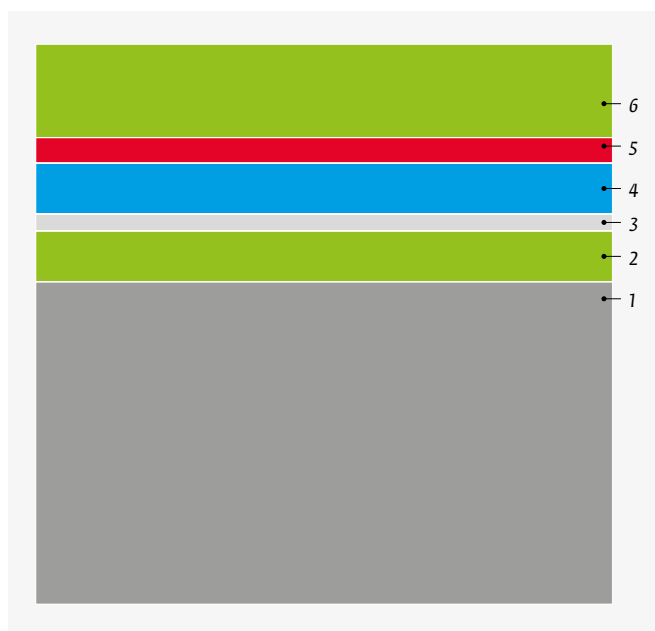
При использовании нитрида титана в качестве пассивирующего слоя на пленке сплава алюминия мигрирующие атомы алюминия взаимодействуют с ним с образованием нитрида алюминия и высвобождением атомов титана. Нитрид титана является нестехиометрическим соединением с избытком атомов титана, поэтому появление дополнительных, высвободившихся в результате реакции, атомов титана в данном слое либо на границе его раздела с алюминием практически незаметно. Диффузия титана в алюминий также не приводит к заметному изменению электропроводности по сравнению с влиянием на этот параметр диффузии кремния. Нитрид алюминия является соединением с ковалентным типом связи, что существенно снижает вероятность появления свободных атомов алюминия и делает невозможным его участие в упомянутых обменных процессах. К тому же нитрид алюминия является полупроводником, что позволяет минимизировать потерю электропроводности системы в целом.

Таким образом, пленка нитрида титана является своеобразной ловушкой для мигрирующих атомов алюминия, что существенно снижает стресс-миграцию в твердотельной структуре. Кроме этого, нитрид титана высокотехнологичен, хорошо совместим с контактирующими слоями и по сравнению с распространенными

диэлектрическими пленками является достаточно пластичным. Это придает ему функцию демпфера между алюминием и пленкой диэлектрика, существенно нивелирующего различие в остаточных напряжениях по площади структуры. Таким образом, пленки нитрида титана обладают необходимым комплексом свойств, позволяющим максимально компенсировать неравномерность остаточных напряжений и надежно пассивировать слой пленки сплава алюминия.

Выбор толщины слоя нитрида титана основан на экспериментальных данных. При толщине слоя менее 0,02 мкм, например 0,01 мкм, эффективность пассивации заметно снижается, так как в результате процессов рекристаллизации возникают отдельные области контакта сплава алюминия с диэлектриком с образованием сопутствующих дефектов и усилением массопереноса. Увеличение толщины слоя нитрида титана свыше 0,1 мкм, например до 0,2 мкм, повышает себестоимость, а дополнительных преимуществ не дает.

На рис. 2 представлено поперечное сечение формируемой твердотельной структуры в составе полупроводникового прибора. В нижнем слое диэлектрика 2, выполняющем роль межуровневой изоляции, сформированы контактные окна (на рисунке не показаны) к активным элементам полупроводниковой пластины 1. В верхнем слое диэлектрика 6, выполняющем обычно защитную



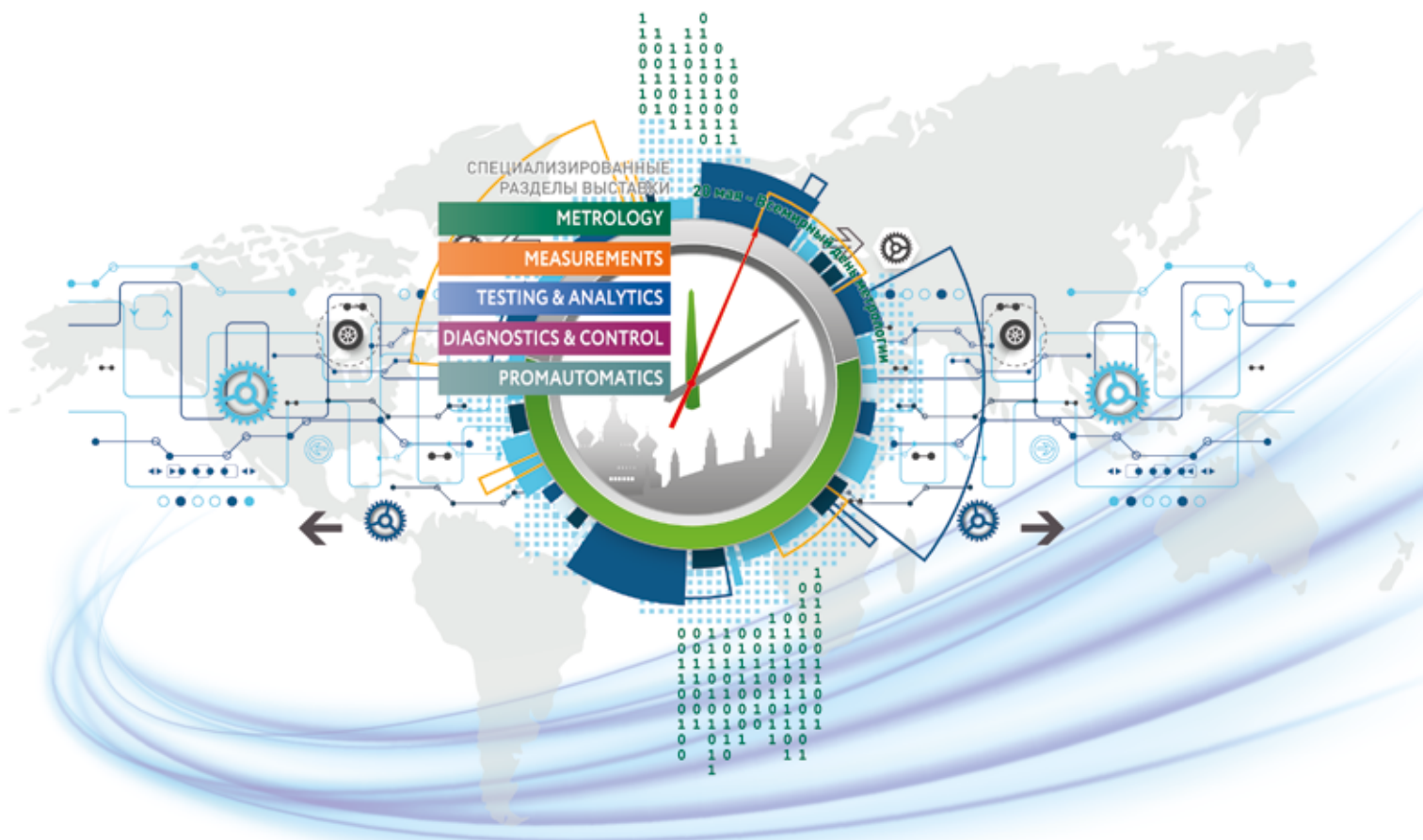
**Рис. 2.** Поперечное сечение формируемой твердотельной структуры в составе полупроводникового прибора: 1 – полупроводниковая пластина с активными элементами; 2 – нижний слой диэлектрика; 3 – барьерный слой; 4 – слой сплава алюминия; 5 – пассивирующий слой; 6 – верхний слой диэлектрика

16-й МОСКОВСКИЙ МЕЖДУНАРОДНЫЙ  
ИННОВАЦИОННЫЙ ФОРУМ И ВЫСТАВКА

ТОЧНЫЕ ИЗМЕРЕНИЯ –  
ОСНОВА КАЧЕСТВА И БЕЗОПАСНОСТИ

# MetrolExpo'2020

Москва, 2-4 июня  
ВДНХ, павильон 75



## ТЕМАТИЧЕСКИЕ РАЗДЕЛЫ ВЫСТАВКИ:



**МЕТРОЛОГИЯ**  
METROLOGY



**ИЗМЕРЕНИЯ**  
MEASUREMENTS



**ИСПЫТАНИЯ И АНАЛИТИКА**  
TESTING & ANALYTICS



**ДИАГНОСТИКА И КОНТРОЛЬ**  
DIAGNOSTICS & CONTROL



**АВТОМАТИЗАЦИЯ**  
PROMAUTOMATICS



Устроитель:

Выставочная компания  
ВЭСТРОЙ ЭКСПО

+7 (495) 937-40-23  
metrol@expoprom.ru

ПРИГЛАШАЕМ ПРИНЯТЬ УЧАСТИЕ

[www.metrol.expoprom.ru](http://www.metrol.expoprom.ru)



функцию, сформированы контактные окна (на рисунке не показаны) к контактным площадкам токопроводящих дорожек, состоящих из последовательно сформированных барьерного слоя 3, слоя сплава алюминия 4 и пассивирующего слоя 5, выполненного из нитрида титана толщиной 0,02–0,10 мкм.

Уменьшение стресс-миграции атомов алюминия при формировании структуры и в процессе работы полупроводникового прибора достигается за счет следующих факторов. Наличие градиента остаточных напряжений в структуре приводит к возникновению в слое сплава алюминия 4 движущей силы самодиффузии атомов алюминия. В случае отсутствия пассивирующего слоя 5 наиболее критичной областью при этом является граница раздела металла с верхним слоем диэлектрика 6, так как от нижнего слоя диэлектрика 2 он отделен барьерным слоем 3.

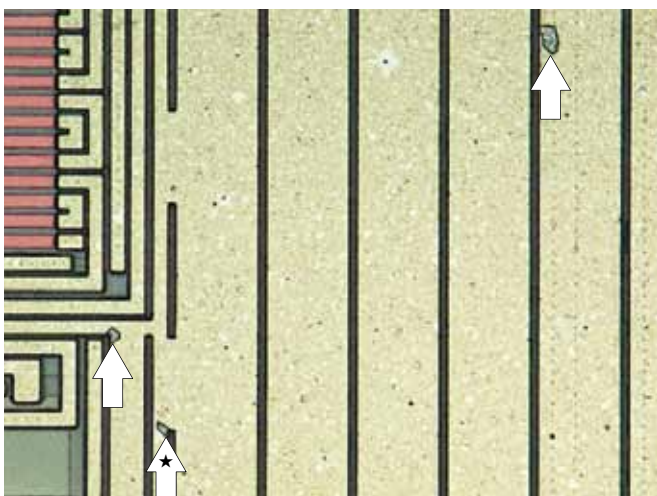
Температурный коэффициент линейного расширения алюминия примерно в 20 раз больше, чем диоксида кремния, что приводит к активной генерации точечных дефектов в слое сплава алюминия 4, который намного пластичнее диоксида кремния. Под действием градиента остаточных напряжений эти точечные дефекты, а именно атомы алюминия и их вакансии, приходят в движение преимущественно по границе раздела «металл – диэлектрик» и со временем приводят к образованию дефектов, изображенных на рис. 3 (указаны фигурными стрелками). Размер этих дефектов в плане может превышать ширину токопроводящих дорожек. Из рис. 3 видно, что дефект, указанный стрелкой со звездочкой, фактически привел к разрыву токопроводящей дорожки. На рис. 4 показан один из дефектов в большом увеличении.

Наличие пассивирующего слоя 5, выполненного из нитрида титана, вследствие его пластичности, с одной стороны, приводит к снижению остаточных напряжений на границе раздела «металл – диэлектрик» и существенно уменьшает количество точечных дефектов в слое сплава алюминия 4. С другой стороны, поскольку алюминий химически более активен по сравнению с титаном, мигрирующие атомы алюминия вступают в химическую реакцию с нитридом титана с образованием нитрида алюминия, который прочно удерживается в этом слое за счет ковалентного характера химической связи.

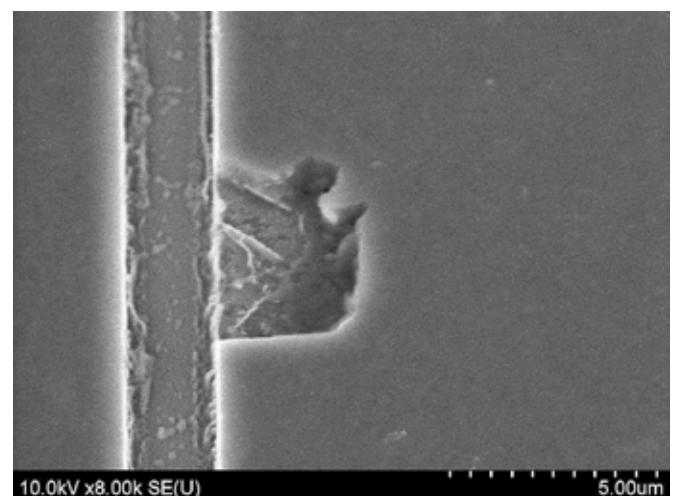
Именно по этой причине нитрид титана является своеобразной ловушкой для мигрирующих атомов алюминия. Высвободившиеся атомы титана характеризуются относительно невысоким коэффициентом диффузии и не приводят к возникновению упомянутых дефектов в виде ямок или бугорков. Поверхность получаемой токопроводящей системы, как видно из рис. 5, при этом не содержит каких-либо дефектов.

Таким образом, формирование пассивирующего слоя нитрида титана на слое сплава алюминия способствует нивелированию остаточных напряжений в структуре и улавливанию мигрирующих атомов алюминия, что существенно снижает процессы стресс-миграции в системе.

Предложенный метод реализован при изготовлении ИМС типа IZ1990. Активные элементы структуры формировали стандартными методами в соответствии с требованиями действующей технической документации. После формирования межуровневой диэлектрической изоляции и вскрытия в ней контактных окон на всю поверхность пластины на установке напыления



**Рис. 3.** Фотография фрагмента поверхности структуры, полученной по стандартному процессу, с наблюдаемыми дефектами



**Рис. 4.** Фотография одного из наблюдаемых дефектов, сделанная с помощью растрового электронного микроскопа

# SEMIEXPO RUSSIA

**SEMIEXPO Russia** объединяет международную специализированную выставку с двухдневной деловой программой, где ежегодно принимают участие руководители, эксперты, топ-менеджеры крупнейших компаний по микроэлектронике, представители органов государственной власти, научно-исследовательских институтов и международных ассоциаций.

## Программные мероприятия на SEMIEXPO Russia 2020

SEMI Member Forum 2020

Международный MEMS Forum

Новый этап конкурса  
«Инновационная радиозлектроника»

Обзор карьерных возможностей  
и ежегодный День Талантов

Экспортные перспективы.  
Открытый диалог с зарубежными  
рынками

Экспозиция кластеров из Европы и  
Азии

**МОСКВА**

**ЭКСПОЦЕНТР**

**9-10 ИЮНЯ 2020**

**ВЫСТАВКА И КОНФЕРЕНЦИЯ  
ПО ТЕХНОЛОГИЯМ, МАТЕРИАЛАМ,  
СТАНДАРТАМ И ОБОРУДОВАНИЮ В  
ОБЛАСТИ МИКРОЭЛЕКТРОНИКИ**

Больше информации на официальном сайте

**[www.semiexpo.ru](http://www.semiexpo.ru)**

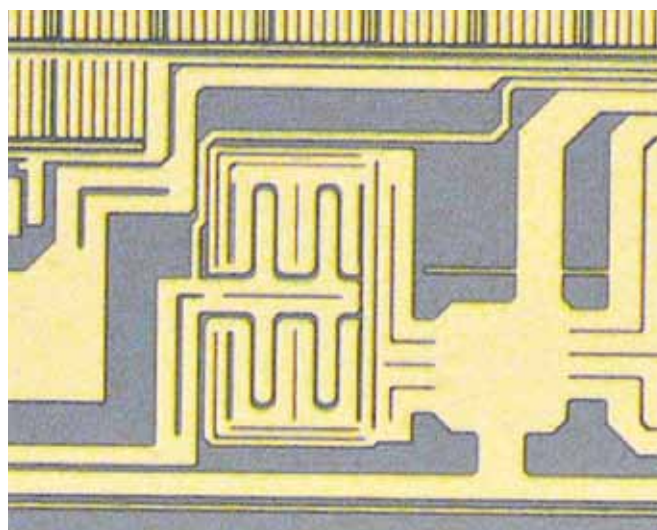
 **@semiexporussia**

типа Endura наносили пленку титана толщиной 20 нм, служащую барьерным слоем, затем пленку сплава алюминия с 0,5% меди толщиной 0,8 мкм, а затем пленку нитрида титана, служащую пассивирующим слоем. Толщина слоя нитрида титана указана в табл. 1.

Далее стандартными методами фотолитографии и травления формировали требуемый топологический рисунок токопроводящей системы и проводили ее термообработку при 450 °С. Затем формировали диэлектрическое защитное покрытие требуемой топологической конфигурации и проводили стабилизирующую термообработку при температуре 400 °С в течение 6 ч, после чего осуществляли контроль функционирования и анализ внешнего вида (ВВ) полученных структур. Результаты контроля и анализа внешнего вида приведены в табл. 1. Серым цветом выделены данные, при которых наблюдается значительный процент брака или превышение нормативной трудоемкости.

Из приведенных данных видно, что рассматриваемый метод изготовления многослойной токопроводящей структуры кремниевых полупроводниковых приборов и ИМС характеризуется более высоким качеством за счет повышенной устойчивости к стресс-миграции.

Результаты данного исследования могут быть использованы при изготовлении кремниевых полупроводниковых приборов и интегральных микросхем. Показано, что в интегральных микросхемах с малыми



**Рис. 5.** Фотография фрагмента бездефектной поверхности структуры, полученной по предложенному способу, после удаления пассивирующего слоя нитрида титана

топологическими размерами токопроводящих пленок на основе алюминия, в том числе многослойных, имеется развитый рельеф поверхности кристалла, и на ступеньках рельефа реально уменьшается толщина пленок, что при протекании токов высокой плотности создает предпосылки к массопереносу или стресс-миграции атомов алюминия. Это может приводить

**Таблица 1.** Экспериментальные данные по выборке 1000 шт. ИМС с дополнительным пассивирующим слоем

№ п/п	Толщина пленки нитрида титана, мкм	Выход годных кристаллов на контроле функционирования, %	Выход годных кристаллов на анализе ВВ, %	Количество брака по дефектам стресс-миграции токопроводящей пленки, % от общего количества брака	Примечание
1	0,01	81	89	45	
2	0,02	87	96	0	Внешний вид твердотельной структуры приведен на рис. 5
3	0,05	92	98	0	
4	0,10	91	97	0	
5	0,20	89	94	0	Превышение нормативной трудоемкости
6	Типовой процесс	73	67	94	Внешний вид твердотельной структуры приведен на рис. 3

в конечном счете к образованию макроскопических пустот на одних участках и бугорков на других.

Предложенное техническое решение позволяет улучшить качество получаемых пленочных структур на основе алюминия за счет повышения их устойчивости к стресс-миграции. Сущность такого технического решения заключается в формировании ловушек для мигрирующих атомов алюминия при протекании тока высокой плотности (порядка  $10^5$  А/мм<sup>2</sup>) нанесением на слой алюминия или его сплава пассивирующего слоя нитрида титана толщиной 0,02–0,10 мкм. Получены положительные результаты при апробации таких пленок на интегральных микросхемах типа IZ1990 и других микросхемах, изготавливаемых на пластинах диаметром 200 мм.

## ЛИТЕРАТУРА

1. **Баранов В. В.** Приборы твердотельной электроники, тестирование, измерения. Биомедицинские диагностические технологии // Доклады БГУИР. 2014. № 2 (80). С. 23–31.
2. **Emelyanov V. A., Baranov V. V., Emelyanov A. V.** Evolution of VLSIs Materials and Packaging Technology Correlated with Progress of Thin Films Deposition and Outlets Bonding Methods // Proceedings of the 2<sup>nd</sup> Electronics System-Integration Technology Conference – ESTC-2008. – London, September 2008. P. 779–783.
3. **Панин В. Е., Сергеев В. П., Панин А. В.** Наноструктурирование поверхностных слоев конструкционных материалов и нанесение наноструктурных покрытий. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2010. 254 с.
4. **Емельянов В. А.** Технология микромонтажа интегральных схем. Корпусирование кристаллов. Saarbrucken, Германия, LAMBERT – Academic Publishing, 2012. 360 р.
5. **Достанко А. П., Баранов В. В., Соловьев Я. А.** Распределение остаточных механических напряжений в тонких пленках // Доклады НАНБ. 2002. Т. 46. № 4. С. 119–122.
6. **Баранов В. В.** Изделия силовой электроники, датчики, биомедицинские технологии // Доклады БГУИР. 2019. № 3 (121). С. 70–75.
7. **Емельянов В. А.** Способ изготовления системы металлизации кремниевого полупроводникового прибора. – Патент РФ 11167. Опубл. 07.07.2008 г.
8. **Widmann D., Mader H., Friedrich H.** Technology of Integrated Circuits. Germany, Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2000. 200 р.
9. **Данилина Т. И., Кагадей В. А.** Технология СБИС. – Томск: Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники, 2007. 287 с.



# МЕЖДУНАРОДНАЯ ПАРТНЕРСКАЯ 2020 КОНФЕРЕНЦИЯ



20 февраля  
Начало в 10:00



Москва, ул. Русаковская, 24  
Holiday inn Moscow Sokolniki



Регистрация на сайте: [conference.prosoft.ru](http://conference.prosoft.ru)  
Телефон: +7(495)234-22-26

**PROSOFT**®

# INDUSTRY

