

В. А. Емельянов, В. В. Баранов, В. В. Емельянов

Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, Минск, Республика Беларусь

МНОГОСЛОЙНЫЕ ТОКОПРОВОДЯЩИЕ ПЛЕНКИ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ ПРИБОРОВ И ИНТЕГРАЛЬНЫХ МИКРОСХЕМ

Аннотация. Исследовано явление стресс-миграции в пленках сплава Al–Si, которое проявляется при протекании тока высокой плотности (порядка 10^5 А/мм²). По результатам исследований предлагается техническое решение, которое позволяет повысить качество получаемых пленочных структур. Его сущность заключается в формировании в пленках ловушек для мигрирующих атомов алюминия при протекании тока высокой плотности за счет формирования пассивирующего слоя TiN на поверхности слоя, например Al–1,5 %Si. При наличии развитого рельефа поверхности современных интегральных микросхем, например с субмикронными размерами элементов топологии, толщина и структура металлических токопроводящих пленок на ступеньках рельефа отличается от расположенных на планарных участках. Это приводит к появлению существенных градиентов механических напряжений, которые являются движущей силой стресс-миграции. Температурный коэффициент линейного расширения алюминия примерно в 20 раз больше, чем диоксида кремния, что обуславливает активную генерацию точечных дефектов в слое сплава на основе алюминия, который намного пластичнее диоксида кремния. Под действием градиента остаточных напряжений существующие в пленках точечные дефекты, например, вакансии, приходят в движение преимущественно по границе раздела металл–диэлектрик и со временем под влиянием тока высокой плотности приводят к образованию групповых дефектов в пленке сплава, в частности пустот, бугорков и др. Так как процессы стресс-миграции на этих участках происходят наиболее интенсивно, то в результате происходит разрыв пленок преимущественно на ступеньках топологического рельефа. Результаты исследования прошли апробацию и могут быть использованы при изготовлении кремниевых полупроводниковых приборов и интегральных микросхем.

Ключевые слова: многослойные тонкие пленки, стресс-миграция, рельеф поверхности, ловушки для мигрирующих атомов алюминия, апробация на интегральных микросхемах

Для цитирования: Емельянов, В. В. Многослойные токопроводящие пленки на основе алюминия для полупроводниковых приборов и интегральных микросхем / В. В. Емельянов, В. А. Емельянов, В. В. Баранов // Вест. Нац. акад. наук Беларуси. Сер. физ.-техн. наук. – 2020. – Т. 65, № 2. – С. 170–176. <https://doi.org/10.29235/1561-8358-2020-65-2-170-176>

Viktor A. Emelyanov, Valentin V. Baranov, Viktor V. Emelyanov

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

MULTILAYERED CONDUCTIVE FILMS OF SEMICONDUCTOR DEVICES AND INTEGRATED CIRCUITS

Abstract. The stress-migration phenomenon in films of alloy Al–Si which is observed at a current of high density (an order 10^5 A/mm²) is investigated. By results of researches the technical decision which allows quality raise of obtained film structures is offered. Its essence consists in formation in films the traps for migrating atoms of aluminium at course of a current of high density at the expense of formation the passive layer of TiN on the metal layer surface, for example, Al–1,5 %Si. In the presence of advanced relief of a surface of modern integrated circuits, for example with sub-micron sizes of the topology elements, the thickness and structure of metal current-carrying films on relief steps differs from what are located on planar sites. It leads to occurrence of essential gradients of mechanical pressure which are stress-migration motive power. As it is known, that temperature factor of linear expansion of aluminium is approximately 20 times, than SiO₂, that causes active generation of dot defects in a layer of the alloy on the base of aluminium which is much more plastic than SiO₂. Under the influence of a gradient of residual pressure, dot defects, existed in films, for example vacancies, come to movement mainly on border of metal – dielectric and in due course under the influence of a current of high density lead to formation of group defects in an alloy film, in particular emptiness, hills etc. Since stress-migration processes on these sites occur most intensively, as a result there is a rupture of films mainly on steps of a topological relief. Results of the research have passed approbation and can be used at manufacturing of silicon semi-conductor devices and integrated microcircuits.

Keywords: multilayered thin films, stress-migration, a relief of a surface, a trap for migrating atoms of aluminium, approbation on integrated microcircuits

For citation: Emelyanov V. A., Baranov V. V., Emelyanov V. V. Multilayered conductive films of semiconductor devices and integrated circuits. *Vesti Natsyonal'noi akademii nauk Belarusi. Seriya fizika-technichnykh nauk = Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus. Physical-technical series*, 2020, vol. 65, no. 2, pp. 170–176 (in Russian). <https://doi.org/10.29235/1561-8358-2020-65-2-170-176>

Введение. 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 применяемых в приборах и ИМС металлических пленках градиентов механических напряжений [1, 2]. Это преимущественно связано с тем, что одна и та же величина напряжений, обусловленная различной природой контактирующих материалов и особенностями их формирования, локализуется на меньшей площади. Релаксация напряжений в различных материалах, как правило, протекает через их структурно-фазовые превращения. При этом наиболее подвержены таким изменениям материалы, характеризующиеся высокой пластичностью, так как энергия активации данных процессов в них меньше.

В структуре современных ИМС наиболее пластичным материалом является алюминий и его сплавы, используемые для формирования электрических межэлементных соединений и контактирующие, как правило, с упругими слоями на основе диоксида или нитрида кремния. 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 итоге отказов функционирования ИМС.

Типовой процесс изготовления токопроводящих пленок полупроводниковых приборов и ИМС включает формирование на кремниевой подложке с активными областями диэлектрической пленки, преимущественно на основе оксида кремния, образование в этой пленке контактных окон к активным областям, нанесение пленки алюминия и создание топологического рисунка [1].

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 $p-n$ -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 сплаве при этом выбирается близкой к составу эвтектики (98,68 % Al + 1,32 % Si). На практике в технологии используется сплав алюминия с добавкой 1,5 % кремния (АК 1,5). Поэтому в дальнейшем термин «сплав алюминия с кремнием» предполагает именно такой состав, если не оговаривается иной. 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.

Наличие кремния в пленке алюминия замедляет процесс растворения материала подложки в пленке. Однако, как оказалось, и такой способ обладает практически теми же недостатками, что и предыдущий, хотя и в меньшей степени. Это связано с тем, что процесс растворения кремния в алюминии сопровождается его миграцией по границе раздела алюминий/диэлектрик, при этом в качестве диэлектрика 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 металла с диэлектриком вследствие коррозии металла. Это в значительной степени способствует протеканию явлений массопереноса в материале токопроводящей системы.

Еще одним 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 уже в условиях изготовления прибора к появлению существенных градиентов механических напряжений, которые являются движущей силой самодиффузии. Процессы стресс-миграции на этих участках происходят наиболее интенсивно, поэтому разрыв дорожек металлизации наблюдается преимущественно на ступеньках топологического рельефа [5].

Методика исследования. Исследование микроструктуры и особенностей топологии многослойных пленок в составе ИМС мы проводили методом растровой электронной микроскопии (РЭМ) при помощи аппарата Hitachi S 4800 (Япония).

Контроль электрофизических параметров кристаллов ИМС осуществлялся с использованием зондовой станции Cascade (США), а электрических параметров ИМС после сборки – при помощи комплекса Agilent B 1500 A (США). В качестве примера на рис. 1 показана микрофотография фрагмента ИМС с субмикронными проектными нормами.

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. На рис. 2 приведена микрофотография скола твердотельной структуры Si/PtSi/Mo, которая используется для формирования контактов в таких ИМС. В данной структуре барьерным слоем является Mo. Из рисунка видно, что граница раздела между монокристаллическим кремнием и PtSi неоднородна, а для приборов типа диодов Шоттки это имеет принципиальное значение, так как установлено, что при более однородной границе раздела снижается уровень обратных токов в приборах [6].

Также известен способ изготовления многослойных металлических пленок кремниевых полупроводниковых приборов, включающий создание на кремниевой пластине с активными областями диэлектрической пленки на основе диоксида кремния, формирование в диэлектрической пленке контактных окон к активным элементам, нанесение барьерного слоя толщиной 0,005–0,050 мкм, последующее нанесение пленки сплава алюминия с кремнием толщиной 0,5–2,0 мкм, создание топологического рисунка пленки и заключительную термообработку [6]. В качестве барьерного слоя данный способ предполагает использование гидрогенизированного аморфного кремния (патент Республики Беларусь 9585 «Способ изготовления системы металлизации кремниевых полупроводниковых приборов», автор А. В. Емельянов).

Результаты и обсуждение. Недостатком указанного способа является относительно невысокая устойчивость к массопереносу алюминия под действием остаточных механических напряжений в структуре. Проблема осложняется тем, что современные многослойные токопроводящие системы характеризуются чрезвычайно малыми размерами и сложной архитектурой. В зависимости от фактической конструкции прибора, формы кристалла и ряда технологических факторов

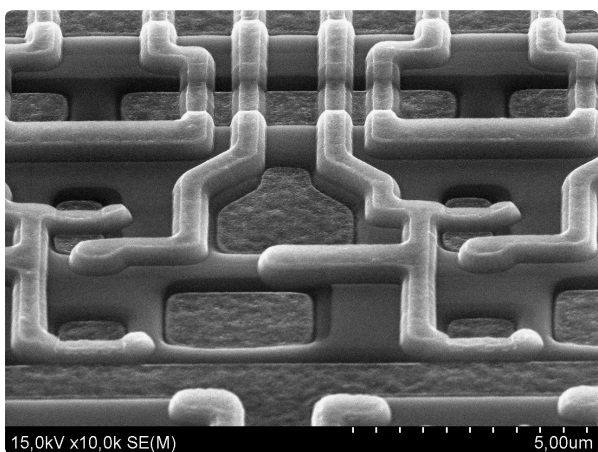


Рис. 1. Микрофотография участка интегральной микросхемы с субмикронными проектными нормами, полученная с помощью РЭМ

Fig. 1. Microphoto of site of integrated circuit with sub-micron design norms (obtained with use of SEM)



Рис. 2. Микрофотография скола твердотельной структуры диода Шоттки типа Si/PtSi/Mo

Fig. 2. Microphoto of solid-state structure Si/PtSi/Mo of diode Shottki

на одном и том же кристалле могут присутствовать как области сжатия, так и области растяжения. Это обуславливает возникновение движущей силы самодиффузии алюминия, образование дефектов металлической пленки в виде ямок и холмиков и снижение 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, что 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 при плотностях тока выше 10^5 А/мм² и описано в [7].

В ходе исследования выявлялись способы повышения качества получаемых токопроводящих пленок за счет повышения их устойчивости к стресс-миграции.

Предложенный нами способ изготовления пленок для кремниевых полупроводниковых приборов и ИМС включает формирование барьерного слоя толщиной 0,005–0,050 мкм, нанесение пленки сплава алюминия толщиной 0,5–2,0 мкм, формирование требуемой топологии и последующую термообработку. После нанесения пленки сплава алюминия на ней формируют пассивирующий слой нитрида титана толщиной 0,02–0,10 мкм. Цель данного технического решения – формирование ловушек для мигрирующих атомов алюминия.

Известно, что процесс массопереноса под воздействием остаточных напряжений протекает преимущественно вблизи поверхности металлической пленки как наиболее дефектной области. Это объясняется как свойствами непосредственно поверхности металла, так и влиянием контактирующих слоев с разными физическими свойствами. Применение разнообразных 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 создание высокостабильных приборов предполагает, как правило, длительную (4–6 ч и более) термическую обработку полностью изготовленных структур, а алюминий является химически достаточно активным элементом, то 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, тем самым способствуя возникновению новых точечных дефектов, а образовавшийся оксид алюминия выступает центром зарождения новых дефектов типа алюмосиликатов за счет его взаимодействия с диоксидом кремния. К тому же оксид алюминия выступает как соединение с ионным типом химической связи, что обуславливает его участие 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 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 возникновение дополнительных высвободившихся в результате реакции атомов титана в данном слое либо на границе его раздела с алюминием протекает практически незамеченным. Диффузия титана в алюминий по сравнению с диффузией кремния также не приводит к заметному изменению электропроводности. Нитрид алюминия является соединением с ковалентным типом связи, что существенно снижает вероятность образования атомов алюминия и делает невозможным его участие в упомянутых обменных процессах. К тому же нитрид алюминия играет роль полупроводника, что позволяет минимизировать потерю электропроводности системы в целом.

Из сказанного можно заключить, что 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

достаточно пластичен. Данные свойства позволяют нитриду титана выступать демпфером между алюминием и пленкой диэлектрика, существенно нивелирующим различие в остаточных напряжениях по площади структуры.

Таким образом, пленки нитрида титана обладают необходимым комплексом свойств, позволяющим максимально нивелировать 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 выше 0,1 мкм, например до 0,2 мкм, повышает себестоимость, а дополнительных преимуществ не дает.

Сущность предложенного технического решения поясняется рис. 3–5. Так, на рис. 3 представлено поперечное сечение формируемой твердотельной структуры в составе полупроводникового прибора.

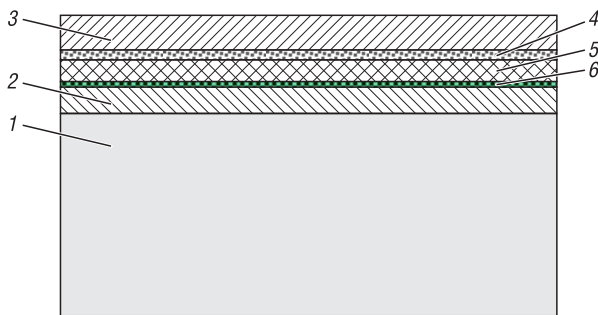


Рис. 3. Поперечное сечение формируемой твердотельной структуры в составе полупроводникового прибора: 1 – полупроводниковая пластина с активными элементами, 2 – нижний слой диэлектрика, 3 – верхний слой диэлектрика, 4 – барьерный слой, 5 – слой сплава алюминия, 6 – пассивирующий слой

Fig. 3. Cross-section of formed solid-state structure as a part of semiconductor device: 1 – a semiconductor plate with active elements, 2 – the bottom layer of dielectric, 3 – the top layer of dielectric, 4 – a barrier layer, 5 – a layer of an alloy of aluminium, 6 – the passive layer

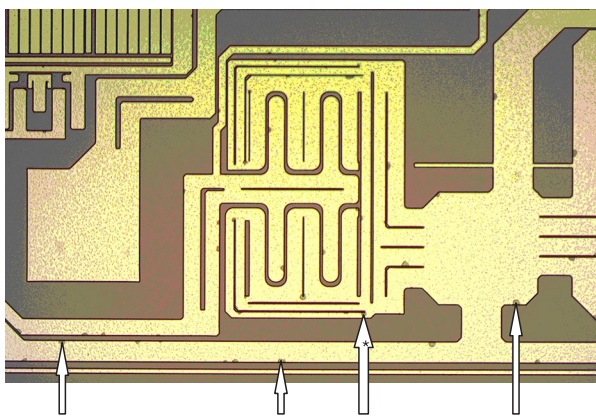


Рис. 4. Фотография фрагмента поверхности структуры, полученной по стандартному способу с наблюдаемыми дефектами

Fig. 4. Photo of a fragment of a surface of the structure obtained by a the standard way with observable defects

В нижнем слое диэлектрика 2, выполняющем роль межуровневой изоляции, сформированы контактные окна (на рисунке не показаны) к активным элементам полупроводниковой пластины. В верхнем слое диэлектрика 3, выполняющем обычно защитную функцию, сформированы контактные окна (также не показаны) к контактными площадкам токопроводящих дорожек, состоящих из последовательно сформированных барьерного слоя 4, слоя сплава алюминия 5 и пассивирующего слоя 6, 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 5 движущей силы самодиффузии атомов алюминия. В случае отсутствия пассивирующего слоя 6 наиболее критичной областью при этом является граница раздела металла с верхним слоем диэлектрика 3.

Температурный коэффициент линейного расширения алюминия примерно в 20 раз больше, чем диоксида кремния, что обуславливает активную генерацию точечных дефектов в слое сплава алюминия 5, 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. 4 (указаны фигурными стрелками). Размер этих дефектов в плане может превышать ширину токопроводящих дорожек. Из рис. 4 видно, что дефект,

указанный стрелкой со звездочкой, фактически привел к разрыву токоведущей дорожки.

Наличие пассивирующего слоя 6, 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 5. 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 заявляемой токопроводящей системы, как видно из рис. 5, при этом не содержит каких-либо дефектов.

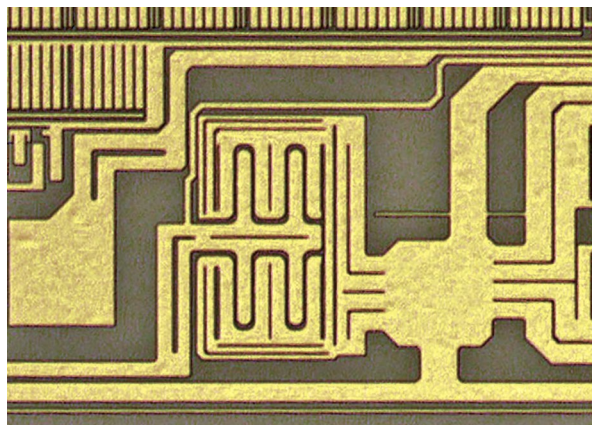


Рис. 5. Фотография фрагмента бездефектной поверхности структуры, полученной по предложенному способу, после удаления пассивирующего слоя нитрида титана
 Fig. 5. Photo of a fragment of a faultless surface of the structure obtained by the offered way, after removal the passive layer of titan nitride

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 IZ1 990. Активные элементы структуры формировали стандартными методами в соответствии с требованиями действующей технической документации. После создания межуровневой диэлектрической изоляции и вскрытия в ней контактных окон на всю поверхность пластины на установке напыления типа Endura последовательно наносили пленку титана толщиной 20 нм, служащую барьерным слоем, пленку сплава алюминия с 0,5 % кремния толщиной 0,8 мкм, пленку нитрида титана, служащую пассивирующим слоем. Толщина слоя нитрида титана указана в таблице.

Далее стандартными методами фотолитографии и травления формировали требуемый топологический рисунок токопроводящей системы и проводили ее термообработку при 450 °С. Затем создавали 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 таблице.

Экспериментальные данные по выборке 1000 штук ИМС с дополнительным пассивирующим слоем
Experimental data on the sample of 1000 pieces integrated microcircuits with additional passive layer

Толщина пленки нитрида кремния, мкм	Выход годных кристаллов на контроле функционирования, %	Выход годных кристаллов на анализе ВВ, %	Количество брака по дефектам стресс-миграции токопроводящей системы, % от общего количества брака	Примечание
0,01	81	89	45	Внешний вид токопроводящей системы приведен на рис. 5
0,02	87	96	0	
0,05	92	98	0	
0,10	91	97	0	
0,20	89	94	0	
Стандартный способ	73	67	94	Превышение нормативной трудоемкости Внешний вид токопроводящей системы приведен на рис. 4

Заклучение. В результате исследований микроструктуры и особенностей топологии многослойных пленок в составе полупроводниковых приборов и ИМС методом растровой электронной микроскопии при помощи аппарата Hitachi S 4800 (Япония), а также контролируя электрофизические параметры кристаллов ИМС с использованием зондовой станции Cascade (США) и электрические параметры ИМС после сборки при помощи комплекса Agilent B 1500 A (США), показано, что описанный в данной статье метод изготовления многослойной токопроводящей структуры кремниевых полупроводниковых приборов и ИМС обеспечивает более высокое качество за счет повышенной устойчивости к стресс-миграции. Полученные результаты могут быть использованы при изготовлении кремниевых полупроводниковых приборов и ИМС.

Список использованных источников

1. Баранов, В. В. Приборы твердотельной электроники, тестирование, измерения. Биомедицинские диагностические технологии / В. В. Баранов // Доклады БГУИР. – 2014. – № 2 (80). – С. 23–31.
2. Emelyanov, V. A. Evolution of VLSIs Materials and Packaging Technology Correlated with Progress of Thin Films Deposition and Outlets Bonding Methods / V. A. Emelyanov, V. V. Baranov, F. V. Emelyanov // Proceedings of the 2nd Electronics System-Integration Technology Conference – ESTC-2008. – London, 2008. – P. 779–783.
3. Колешко, В. М. Массоперенос в тонких пленках / В. М. Колешко, В. Ф. Белицкий. – Минск: Наука и техника, 1980. – 296 с.
4. Емельянов, В. А. Технология микромонтажа интегральных схем / В. А. Емельянов; под ред. В. В. Баранова. – Минск: Беларус. навука, 2002. – 335 с.
5. Достанко, А. П. Распределение остаточных механических напряжений в тонких пленках / А. П. Достанко, В. В. Баранов, Я. А. Соловьев // Докл. Нац. акад. наук Беларуси. – 2002. – Т. 46, № 4. – С. 119–122.
6. Баранов, В. В. Изделия силовой электроники, датчики, биомедицинские технологии / В. В. Баранов // Докл. БГУИР. – 2019. – № 3 (121). – С. 70–75.
7. Достанко, А. П. Пленочные токопроводящие системы СБИС / А. П. Достанко, В. В. Баранов, В. В. Шаталов. – Минск: Высш. шк., 1989. – 238 с.

References

1. Baranov V. V. Solid state devices, testing, measuring. Biomedical diagnostic technologies. *Doklady Belorusskogo gosudarstvennogo universiteta informatiki i radioelektroniki = Doklady BGUIR*, 2014, no. 2 (80), pp. 23–31 (in Russian).
2. Emel'yanov V. A., Baranov V. V., Emel'yanov F. V. Evolution of VLSIs Materials and Packaging Technology Correlated with Progress of Thin Films Deposition and Outlets Bonding Methods. *Proceedings of the 2nd Electronics System-Integration Technology Conference – ESTC-2008*. London, 2008. Pp. 779–783. <https://doi.org/10.1109/estc.2008.4684450>
3. Koleshko V. M., Belitskii V. F. *Thin-film mass transfer*. Minsk, Nauka i tekhnika Publ., 1980. 296 p. (in Russian).
4. Emel'yanov V. A., Baranov V. V. (ed.). *Technology of micromontage of integrated circuits*. Minsk, Belaruskaya navuka Publ., 2002. 335 p. (in Russian).
5. Dostanko A. P., Baranov V. V., Solov'ev Ya. A. Residual stress distribution in thin films. *Doklady Natsional'noi akademii nauk Belarusi = Doklady of the National Academy of Sciences of Belarus*, 2002, vol. 46, no. 4, pp. 119–122 (in Russian).
6. Baranov V. V. Power Electronics Products, Sensors, Biomedical Technologies. *Belorusskogo gosudarstvennogo universiteta informatiki i radioelektroniki = Doklady BGUIR*, 2019, no. 3 (121), pp. 70–75 (in Russian).
7. Dostanko A. P., Baranov V. V., Shatalov V. V. *VLSI Film Conductive Systems*. Minsk, Vysshaya shkola Publ., 1989. 238 p. (in Russian).

Информация об авторах

Емельянов Виктор Андреевич – член-корреспондент Национальной академии наук Беларуси, доктор технических наук, профессор (ул. Бровки, 6, 220013, Минск, Республика Беларусь). E-mail: emeljnov@bk.ru

Баранов Валентин Владимирович – доктор технических наук, профессор, Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники (ул. Бровки, 6, 220013, Минск, Республика Беларусь). E-mail: vvb@bsuir.by

Емельянов Виктор Викторович – магистрант, Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники (ул. Бровки, 6, 220013, Минск, Республика Беларусь). E-mail: emeljnov@bk.ru

Information about the authors

Viktor A. Emelyanov – Corresponding Member of the National Academy of Science, D. Sc. (Engineering), Professor (6, Brovka Str., 220013, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: emel-jnov@bk.ru

Valentin V. Baranov – D. Sc. (Engineering), Professor, Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics (6, Brovka Str., 220013, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: vvb@bsuir.by

Viktor V. Emelyanov – Magister, Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics (6, Brovka Str., 220013, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: emeljnov@bk.ru