УДК 538.975

К. Н. Нищев, В. А. Мартыненко, В. И. Беглов, А. В. Гришанин, В. В. Елисеев, М. Ю. Малыгин, М. И. Новопольцев, В. А. Юдин

ИССЛЕДОВАНИЯ СВОЙСТВ МНОГОСЛОЙНОЙ МЕТАЛЛИЗАЦИИ СТРУКТУР «КРЕМНИЙ НА МОЛИБДЕНЕ», ПОЛУЧЕННОЙ МЕТОДОМ МАГНЕТРОННОГО РАСПЫЛЕНИЯ[1]

Аннотация. *Актуальность и цели.* Межэлементные соединения современных силовых полупроводниковых приборов должны обладать в широком диапазоне рабочих температур минимальными электрическими и тепловыми сопротивлениями, индуктивностью и высокой механической прочностью. Важную роль в технологии таких соединений играют металлические слои, нанесенные составные части силовых полупроводниковых приборов: кремниевые структуры и молибденовые термокомпенсаторы. Они должны обладать высокой прочностью и адгезией к поверхностям кремниевых структур, молибденовых термокомпенсаторов и припоям, которые используются в технологии межэлементных соединений. Целью данной работы является исследование свойств многослойной металлизации поверхностей межэлементных соединений и молибденовых термокомпенсаторов, используемых в структуре «кремний на молибдене» с низкотемпературными соединениями мощных силовых полупроводниковых приборов нового поколения. *Материалы и методы.* Исследовано несколько вариантов многослойной металлизации, нанесенной магнетронным напылением на шлифованные поверхности межэлементных соединений и молибденовых термокомпенсаторов: Al-Ti-Ni-Ag, Ti-Ni-Ag, Ni-Ag и Ag. Для измерения адгезионной прочности многослойной металлизации использовался метод измерительного царапания (скретч-тестирования). Элементный состав слоев металлизации определялся на растровом электронном микроскопе Quanta 200i 3D FEI с использованием возможностей функции картирования. *Результаты.* Установлено, что значения массовой доли основного элемента в слоях многослойной металлизации кремниевых структур находятся в интервале от 97 до 99 %, а в слоях многослойной металлизации молибденовых термокомпенсаторов – от 97 до 98 %. Исследована зависимость адгезионной прочности покрытий от вида многослойной металлизации кремниевых структур и молибденовых термокомпенсаторов, суммарной толщины ее слоев и вида термообработки. Установлено, что максимальную адгезионную прочность на поверхности кремниевых структур имеет четырехслойная металлизация Al-Ti-Ni-Ag после ее отжига в вакууме. На поверхности молибденовых термокомпенсаторов максимальная адгезионная прочность у двухслойной металлизации Ni-Ag отожженной в вакууме. *Выводы.* В качестве покрытий кремниевых структур и молибденовых термокомпенсаторов в производстве силовых полупроводниковых приборов нового поколения могут быть использованы соответственно четырехслойные системы Al-Ti-Ni-Ag, полученные методом магнетронного распыления после их отжига в вакууме и двухслойные системы Ni-Ag, отожженные в вакууме.

Ключевые слова: силовые полупроводниковые приборы, структуры «кремний на молибдене», многослойные металлические покрытия, адгезия, измерительное царапание (скретч-тестирование).

[1] Работа выполнена в рамках договора № 02.G25.31.0051 между ОАО «Электровыпрямитель» и Министерством образования и науки Российской Федерации об условиях предоставления и использования субсидии на реализацию комплексного проекта по созданию высокотехнологичного производства, выполняемого с участием российского высшего учебного заведения.

K. N. Nishchev, V. A. Martynenko, V. I. Beglov, A. V. Grishanin, V. V. Eliseev, M. Yu. Malygin, M. I. Novopol'tsev, V. A. Yudin

THE RESEARCH OF THE PROPERTIES OF MULTILAYER METALLIZATION OF THE STRUCTURES “SILICON ON MOLYBDENUM” OBTAINED BY MAGNETRON SPUTTERING

Abstract. *Background*. The interelement connection of modern power semiconductor devices must possess minimal electrical and thermal resistance, inductance and high mechanical strength in a wide range of operating temperatures. Metal layers coating the components of power semiconductor devices, silicon structures and molybdenum temperature compensators play an important role in the technology of such compounds. They must have high strength and adhesion to the surfaces of silicon structures, of molybdenum temperature compensators and solders, which are used in interelement connection technologies. The aim of this paper is to study the properties of surface multilayer metallization of interelement connections and molybdenum temperature compensators used in the structure "silicon-on-molybdenum" with low-temperature compounds of new generation high-performance power semiconductor devices. *Materials and methods*. Several options (Al-Ti-Ni-Ag, Ti-Ni-Ag, Ni-Ag and Ag) of multilayer metallization deposited by magnetron sputtering onto the ground surfaces of interelement connections and molybdenum thermal compensators are studied. To measure the adhesion strength of the multilayer metallization the method of measuring the scratch (scratch test) is used. The elemental composition of the metallization layers was determined by scanning with the electron microscope Quanta 200i 3D FEI using the mapping function possibilities. *Results*. It is established that the values of the basic element mass fraction in the multilayer metallization layers in silicon structures range from 97 to 99 % and in the multilayer metallization layers of molybdenum temperature compensators it varies from 97 to 98 %. The dependence of the adhesive strength of the coatings on the type of multilayer metallization of silicon structures and molybdenum temperature compensators, the total layer thickness and the type of heat treatment were studied. It was established that a four-layer metallization of Al-Ti-Ni-Ag after annealing in vacuum has the maximum adhesive strength on the surface of the silicon structures. A two-layer metallization Ni-Ag after annealing in vacuum possesses the maximum adhesive strength on the surface of the molybdenum temperature compensators. *Conclusions*. Four-layer Al-Ti-Ni-Ag systems obtained by magnetron sputtering after annealing in vacuum and two-layer Ni-Ag systems annealed in vacuum can be used as a coating for silicon structures and molybdenum temperature compensators respectively while manufacturing new generation power semiconductor devices.

Key words: power semiconductor devices, structure "silicon on molybdenum", multilayer metallic coating, adhesion, measuring scratching (scratch test).

Введение

Современная силовая электроника развивается как по пути создания новых типов силовых полупроводниковых приборов (СПП), так и по пути повышения их технических характеристик и расширения областей применения. Основные параметры приборов силовой электроники и их надежность определяются зачастую не столько свойствами полупроводниковых структур, сколько технологией межэлементных соединений и сборки в корпус электрически активных функциональных элементов. Требования к этим соединениям

и сборкам чрезвычайно высоки. Они должны одновременно обладать минимальными электрическими и тепловыми сопротивлениями, низкой индуктивностью, способностью мгновенно отводить возникающие в полупроводниковых структурах потери мощности без заметной разницы температур на полупроводниковом кристалле и поверхности корпуса. Кроме того, межэлементные соединения должны обладать высокой механической прочностью в широком диапазоне температур и при циклических нагрузках мощности.

Требования к тепловым, термомеханическим и электрическим свойствам элементов приборов силовой электроники весьма высоки. Например, мощные тиристоры переключают токи до 5000 А [1], импульсные фототиристоры и реверсивно-включаемые динисторы коммутируют токи амплитудой соответственно до 150 кА [2] и 500 кА [3] при напряжениях 2,0–5,0 кВ. Рабочая температура активных кремниевых приборов, работающих в частотном режиме, составляет до 150 °С, а в импульсных режимах – до 350 °С. Плотности теплового потока при этом могут превышать 500 МВт/м^2. В циклических режимах приборы подвергаются перепадам температур до 200 °С. При этом срок службы таких приборов должен быть не менее 20 лет. Данные требования положены в основу разработки новой технологии межэлементных соединений в силовых полупроводниковых приборах нового типа.

Важную роль в технологии межэлементных соединений играют металлические слои, нанесенные на кремниевые структуры (КС) и молибденовые термокомпенсаторы (МТ) СПП. Они должны обеспечивать низкие переходные электрические и тепловые сопротивления, обладать высокой прочностью и адгезией к контактным поверхностям КС и МТ. Кроме того, металлические слои должны быть пригодны для прочного и равномерного соединения с припоями, которые используются в технологии межэлементных соединений и сборок СПП.

В данной работе исследовались многослойные металлические покрытия типа Al-Ti-Ni-Ag и Ni-Ag, которые наносились на шлифованные поверхности КС и МТ, предназначенных для изготовления структур «кремний на молибдене» (КНМ) диаметром до 5 дюймов с использованием низкотемпературных соединений.

1. Толщины и элементный состав металлических слоев

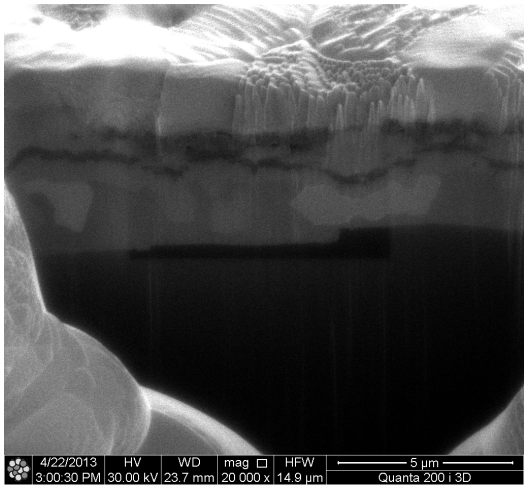
Металлические слои наносились на рабочие поверхности КС и МТ методом магнетронного распыления на установке «Каролина Д 15 Б». Режимы металлизации устанавливались в зависимости от вида материала и толщины наносимых слоев. Температура подложки, на которой размещались кремниевые структуры и термокомпенсаторы во время процесса напыления, составляла около 250 °С. Толщины металлических слоев, нанесенных на кремниевые структуры и молибденовые термокомпенсаторы, определяли с помощью многофункционального растрового электронного микроскопа Quanta 200i 3D FEI и на рентгенофлуоресцентном анализаторе покрытий «X-Strata 980» соответственно.

Изготавливались и исследовались четыре вида многослойной металлизации КС: Al(1,01)-Ti(0,22)-Ni(0,55)-Ag(0,43) (здесь и в дальнейшем – цифры в скобках после обозначений металлов означают толщины слоев в микронах); Ti(0,12)-Ni(0,49)-Ag(0,24); Ni(0,57)-Ag(1,06); Al(0,95)-Ti(0,12)-Ni(0,48)-Ag(0,22) и три вида металлизации МТ: Ag(1,06); Ag(2,05); Ni(0,43)-Ag(1,05). После

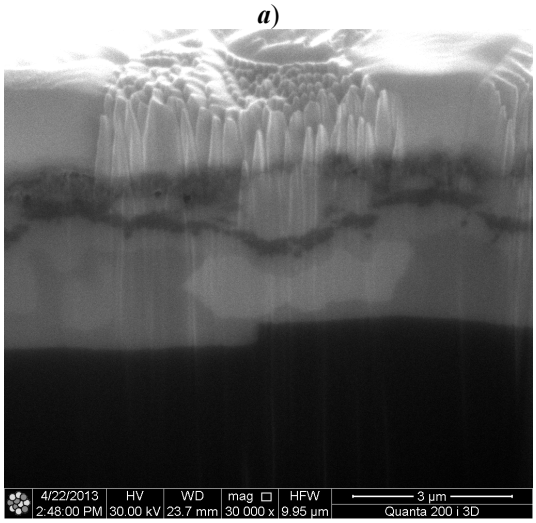
осаждения металлических слоев на КС и МТ часть из них подвергалась отжигу в вакууме и в водороде при температуре около 500 °С.

Исследования элементного состава металлических слоев, нанесенных на кремниевую структуру и молибденовый термокомпенсатор, проводились на многофункциональном растровом электронном микроскопе Quanta 200 i 3D FEI с помощью энергодисперсионного кремниевого дрейфового детектора Apollo X для микрорентгеноспектрального анализа. Возбуждение атомов осуществлялось пучком электронов энергией 5–30 кэВ. Идентификация неизвестных элементов проводилась с учетом K, L и M серий в спектрах, полученных с помощью Li-Si детектора в зависимости от их положения в энергетическом диапазоне 5–30 кэВ.

Используя функцию фокусированного ионного пучка (ФИП), формировали поперечный срез покрытия КС и МТ, электронно-микроскопическое изображение которого приведено на рис. 1.



а)



б)

Рис. 1. Поперечный срез сфокусированным ионным пучком металлического покрытия на поверхности КС: ***а*** – ×20000; ***б*** – ×30000

Применяя возможности функции картирования растрового электронного микроскопа Quanta 200i 3D FEI (рис. 2) в исследовательских испытаниях определили элементный состав многослойных металлических покрытий на КС и МТ.

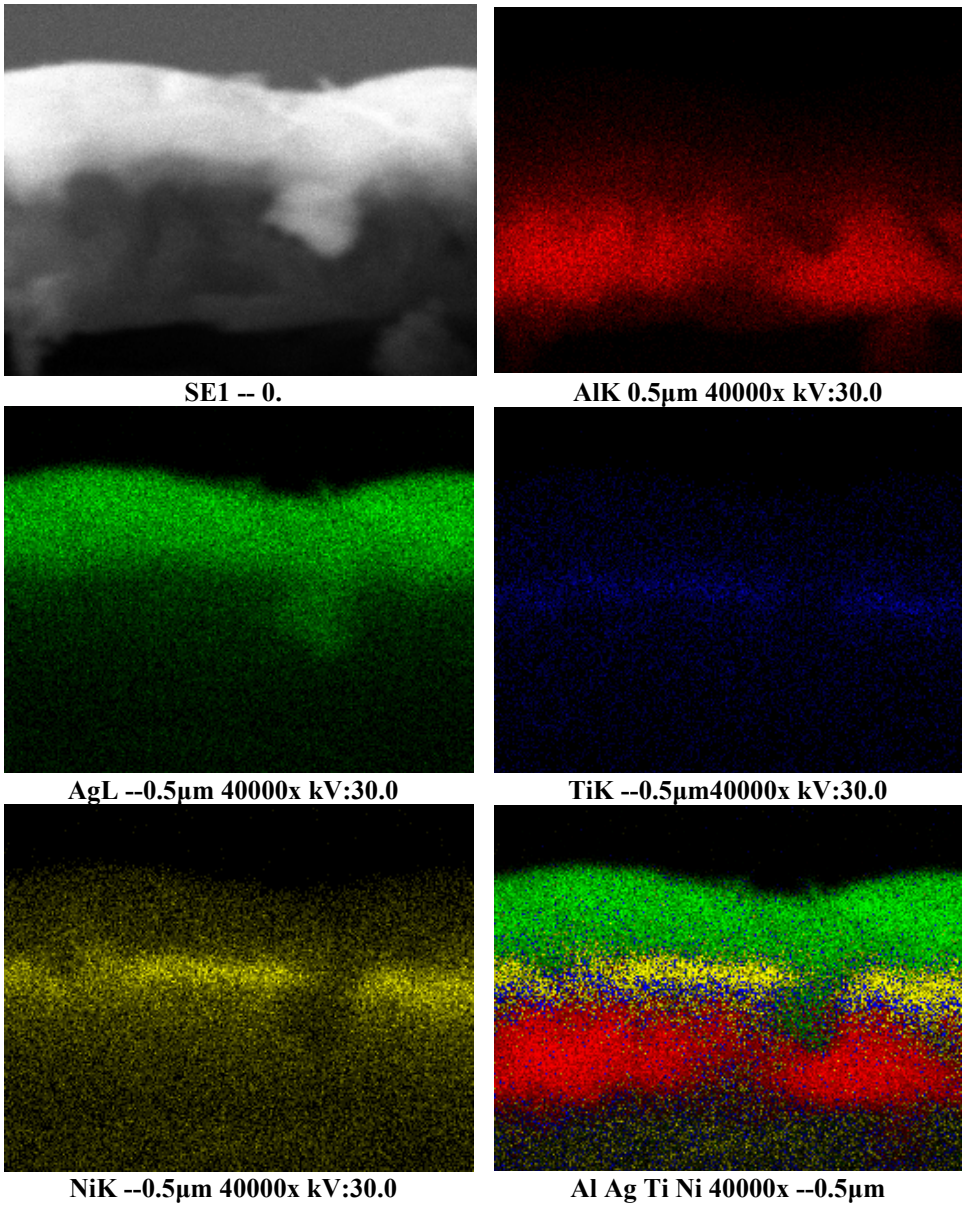


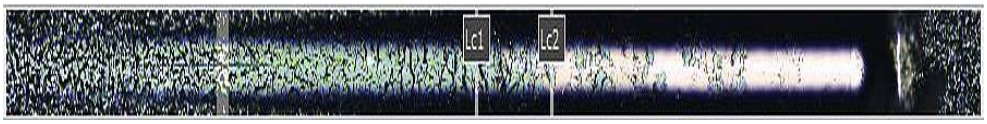
Рис. 2. Использование функции картирования для определения элементного состава многослойных металлических покрытий на КС

В результате исследовательских испытаний элементного состава металлических слоев, нанесенных на кремниевые структуры и молибденовые термокомпенсаторы, установлено, что значения массовой доли основного элемента в слоях многослойной металлизации КС находятся в интервале от 97 до 99 %, а в слоях многослойной металлизации МТ – в интервале от 97 до 98 %.

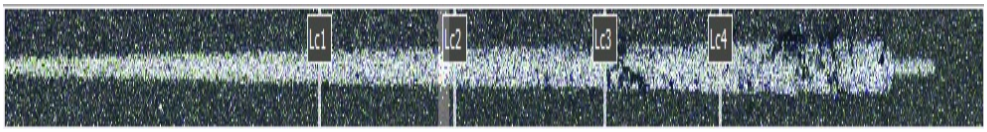
2. Определение механической прочности и адгезии нанесенных металлических слоев методом измерительного царапания (скретч-тестирования)

Важным параметром, характеризующим качество металлических покрытий КС и МТ, является их адгезионная прочность. Существуют различные способы ее повышения [4–8] и измерения. В нашем случае адгезионная прочность нанесенных металлических слоев определялась методом измерительного царапания (скретч-тестирования) [9–11] на скретч-тестере Revetest RST ESM. В качестве количественной характеристики адгезионной прочности исследуемого покрытия нами было принято значение нагрузки, приложенной к индентору, при которой наступает разрушение покрытия. Для отработки методики определения адгезии покрытий к поверхности материала методом скретч-тестирования были проведены предварительные испытания на образцах меди, покрытых гальваническим способом слоем никеля, и на образцах стали, покрытых слоем нитрида титана, ионно-плазменным методом.

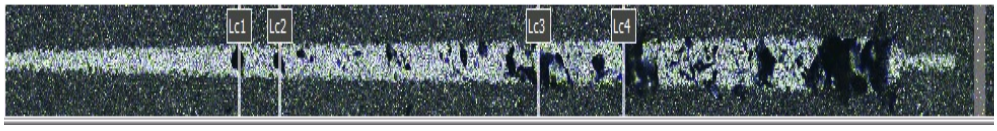
На рис. 3 приведены изображения следов от индентора на никелевых покрытиях меди и кремния, полученные на скретч-тестере Revetest RST ESM. По следу от индентора можно зафиксировать начало разрушения покрытия и развитие этого процесса с увеличением нагрузки. Площадь отслоения пленки возрастает монотонно, и поэтому переход от локального к полному разрушению покрытия носит условный характер. Поскольку регистрируемые при этом зависимости от нагрузки на индентор глубины его проникновения в покрытие и уровень акустического сигнала каких-либо особенностей не имеют, адгезионные свойства покрытия могут быть оценены только по визуальному сопоставлению изображения следа от индентора с приложенной к нему нагрузкой.



а)



б)



в)

Рис. 3. След от индентора в никелевом покрытии на меди (***а***) и на кремнии (***б***, ***в***)

Топография поверхности измерительных царапин и элементный состав материала покрытия в области царапины исследовались на электронном ска-

нирующем микроскопе Phenom Pro X. По полученным электронно-микроскопическим изображениям фрагментов измерительных царапин, нанесенных на металлические покрытия КС и МТ, определялась величина предельного нагружения индентора в момент, предшествующий механическому разрушению покрытия. Одновременно при этом определялось состояние царапины на всех участках следа от индентора, в том числе элементный состав покрытия в области зоны его разрушения. Применяя данную методику, определили адгезионные свойства всех исследуемых металлических покрытий.

3. Исследование влияния технологических параметров получения металлических слоев на их механическую прочность и адгезию

Метод скретч-тестирования использовался нами для определения влияния технологических параметров получения металлических слоев на их адгезионную прочность. Адгезионная прочность оценивалась величиной минимальной нагрузки на индентор, при которой наблюдалось разрушение покрытия при царапании. Исследовательским испытаниям подвергались металлические покрытия, нанесенные магнетронным распылением на образцы КС и МТ, полученные при различных режимах термообработки: без отжига, с отжигом в вакууме и отжигом в водороде.

Результаты проведенных исследовательских испытаний адгезионной прочности покрытий, нанесенных на поверхность КС и МТ, приведены соответственно в табл. 1 и 2.

Таблица 1

Результаты испытаний адгезионной прочности металлических слоев к кремниевым структурам

Вид многослойной металлизации	Адгезионная прочность, Н		
	без отжига	отжиг в вакууме	отжиг в водороде
Al(1,01)-Ti(0,22)-Ni(0,55)-Ag(0,43)	18,2 ± 2,0	21,7 ± 1,6	17,2 ± 1,2
Ti(0,12)-Ni(0,49)-Ag(0,24)	8,8 ± 1,3	8,0 ± 1,4	6,5 ± 0,9
Ni(0,57)-Ag(1,06)	6,8 ± 1,2	12,7 ± 1,1	11,7 ± 1,4
Al(0,95)-Ti(0,12)-Ni(0,48)-Ag(0,22)	14,5 ± 1,6	16,9 ± 0,9	14,7 ± 0,9

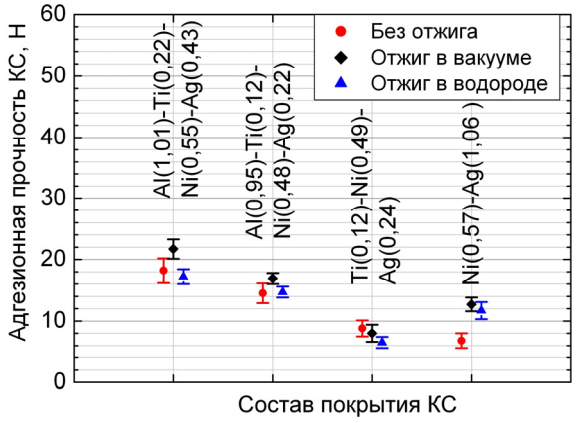
Таблица 2

Результаты испытаний адгезионной прочности металлических слоев к молибденовым термокомпенсаторам

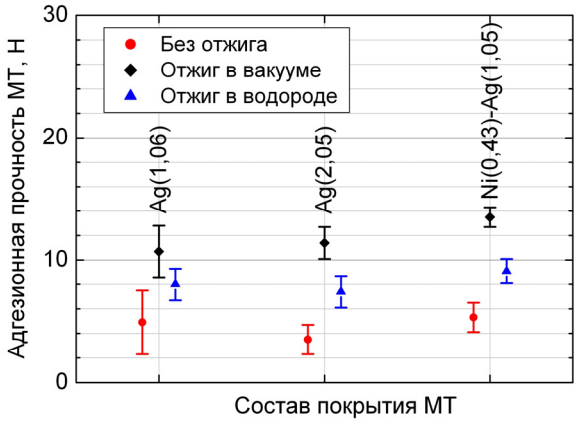
Вид металлизации	Адгезионная прочность Н		
	без отжига	отжиг в вакууме	отжиг в водороде
Ag(1,06)	4,9 ± 1,3	10,7 ± 2,1	8,0 ± 1,3
Ag(2,05)	3,5 ± 1,2	11,4 ± 1,3	7,4 ± 1,3
Ni(0,43)-Ag(1,05)	5,3 ± 1,4	13,5 ± 0,8	9,1 ± 1,0

Результаты определения зависимости адгезионной прочности от состава многослойной металлизации КС приведены на рис. 4,***а***, из которого видно, что состав слоев покрытия сильно влияет на его прочность. Для трехслойного

покрытия Ti(0,12)-Ni(0,49)-Ag(0,24) критическая нагрузка на индентор минимальна и составляет 6,5 Н, а для четырехслойного Al(1,01)-Ti(0,22)-Ni(0,55)-Ag(0,43) – возрастает почти в 3,5 раза – до 22 Н. Низкая адгезионная прочность трехслойного покрытия может быть обусловлена слабой адгезией титана к кремнию.



а)



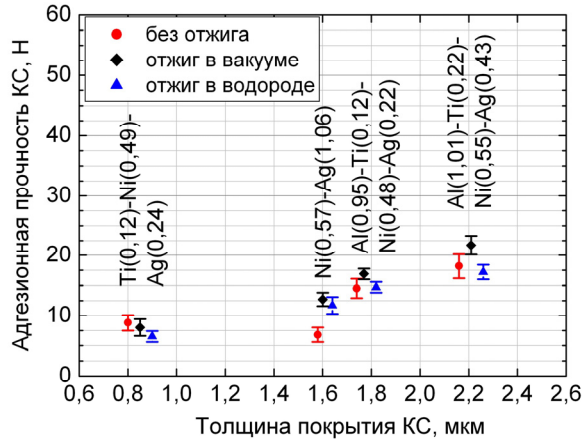
б)

Рис. 4. Зависимость адгезионной прочности от состава покрытия

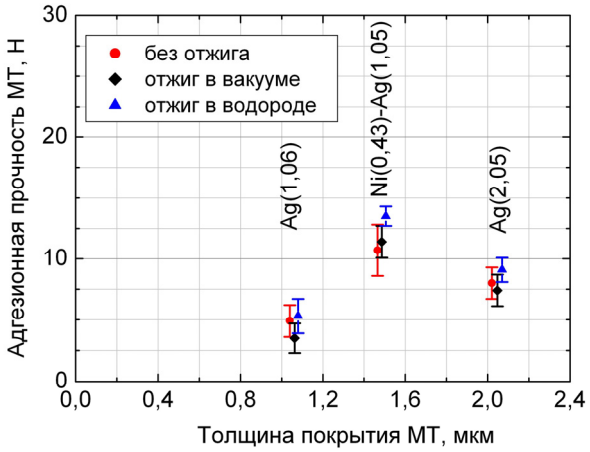
На рис. 4,***б*** приведены результаты исследования зависимости адгезионной прочности от состава многослойной металлизации на поверхности образцов МТ. В пределах погрешности измерений нами не было обнаружено влияния состава покрытия на его прочности.

На рис. 5,***а*** приведены результаты определения зависимости адгезионной прочности от суммарной толщины многослойной металлизации КС. Как следует из этого рисунка, при возрастании толщины четырехслойного покрытия от 1,8 до 2,2 мкм прочность возрастает на 30 %. В покрытиях с толщиной 0,8 и 1,6 мкм, в отличие от указанных выше, непосредственно с поверхностью кремниевой пластины контактируют разнородные металлические слои (Ti и Ni), поэтому данные покрытия следует исключить из рассмотрения.

Результаты исследования зависимости адгезионной прочности от суммарной толщины многослойной металлизации на поверхности образцов МТ приведены на рис. 5,***б***. Увеличение толщины покрытия с 1 до 2 мкм в пределах ошибки измерений не приводит к росту адгезионной прочности покрытия. Для двуслойных покрытий рост прочности нельзя связывать только с толщиной.



а)



б)

Рис. 5. Зависимость адгезионной прочности от толщины покрытия

Адгезионная прочность покрытий определяется не только типом физико-химической связи на границах раздела слоев и их толщиной, но и механическими напряжениями в пленках и подложке. В напряженном состоянии находятся практически все виды пленок, независимо от способа их получения. Механические напряжения в тонкопленочных металлических слоях могут быть столь значительными, что может происходить деформация и отслаивание слоев и даже деформация и частичное разрушение подложки. Для уменьшения механических напряжений в покрытии и восстановления возможных окислов на поверхности серебряной пленки макеты системы КС отжигались в вакууме и в атмосфере водорода при температуре 500 °С в течение 20 мин.

Результаты определения зависимости адгезионной прочности покрытий КС от вида их термообработки приведены на рис. 6,***а***. У покрытия Ni(0,57)-Ag(1,06) на поверхности КС после отжига наблюдается рост адгезионной прочности примерно с 7 до 12 Н. Для четырехслойных структур отжиг в вакууме лишь незначительно увеличивает адгезионную прочность, например, для системы Al(1,01)-Ti(0,22)-Ni(0,55)-Ag(0,43) с 18 до 22 Н.

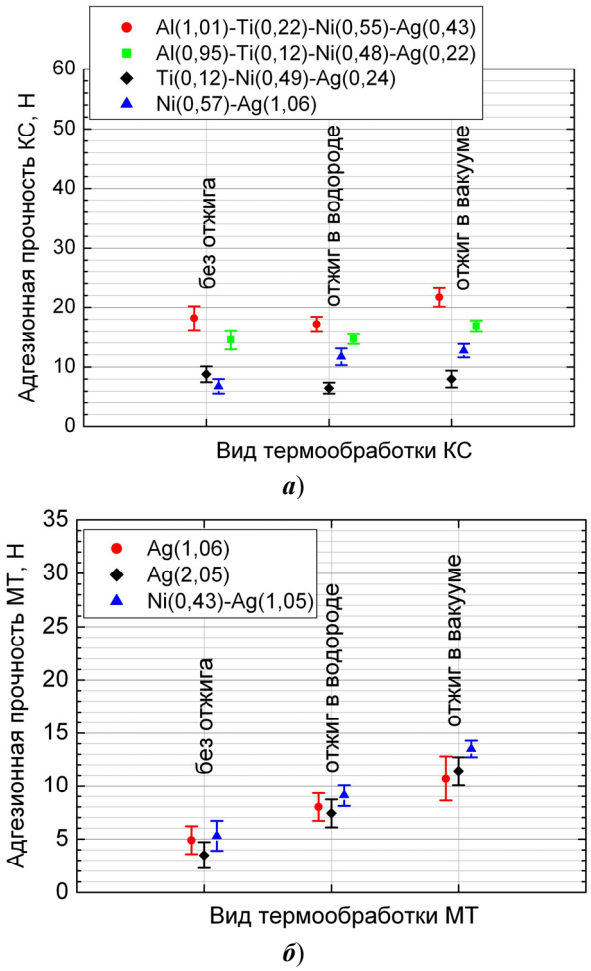


Рис. 6. Зависимость адгезионной прочности от вида термообработки покрытия

Термообработка трехслойных структур Ti(0,12)-Ni(0,49)-Ag(0,24) на поверхности КС приводит к уменьшению прочности, более заметному при отжиге в водороде (примерно с 9 Н до 6,5 Н). Снижение прочности может быть связано с отслаиванием слоев при термообработке из-за различных коэффициентов теплового расширения материалов покрытия и подложки.

При отжиге и последующем охлаждении КС и МТ в атмосфере водорода в них, вероятно, возникают более высокие термические напряжения, чем при охлаждении в вакууме, что является следствием большей скорости охлаждения образцов, обусловленной высокой теплопроводностью водорода.

Из приведенной на рис. 6,***б*** зависимости адгезионной прочности структур МТ от термообработки следует, что максимальной адгезионной прочно-

стью обладают покрытия после отжига в вакууме. Наиболее заметное возрастание прочности (примерно с 5 до 13,5 Н) наблюдается у двухслойных структур покрытия Ni(0,43)-Ag(1,05). Отжиг в водороде дает более низкие значения адгезионной прочности (примерно на 4 Н).

Из анализа результатов исследовательских испытаний следует, что максимальную адгезионную прочность (21,7 Н) имеют образцы КС с четырехслойным покрытием Al(0,95)-Ti(0,12)-Ni(0,48)-Ag(0,22) после их отжига в вакууме. Для образцов МТ максимальная адгезионная прочность равна 13,5 Н с молибденом у двухслойных покрытий Ni(0,43)-Ag(1,05), также отожженных в вакууме.

Заключение

Результаты исследований свойств многослойной металлизации, полученной методом магнетронного распыления, могут быть использованы при отработке технологии межэлементных соединений в производстве силовых полупроводниковых приборов нового поколения.

Список литературы

1. **Мартыненко, В. А.** Новые высокомощные диоды и тиристоры для промышленности, транспорта и энергетики / В. А. Мартыненко, Г. Д. Чумаков // Силовая электроника. – 2005. – № 1. – С. 8–10.
2. **Chibirkin, V. V.** Development and Investigations of Light Triggered Thyristors for Pulse Application / V. V. Chibirkin, V. A. Martynenko, A. A. Khapugin, A. V. Konuchov, S. A. Tundykov, A. V. Grishanin, R. Sh. Enikeev, R. A. Serebrov // PCIM-Europe 2011, 17–19 May 2011. – Nuremberg, Germany, 2011. – P. 640–645.
3. **Galakhov I. V.** New Generation of High-Power Semiconductor Closing Switches for Pulsed Power Applications / I. V. Galakhov, E. A. Kopelovich, V. A. Martynenko et al. // 28th ICPIG, July 15–20, 2007. – Prague, Czech Republic, 2007.
4. А. С. № 362356, кл. НО1С 14/00 С23с 13/02, заявл. 16.04.1970, опубл. 18.12.1972
5. Заявка ФРГ № 1521153, кл. 486 13/08, С23с 13/02, заявл. 07.08.1969, опубл. 07.02.1974.
6. Патент США № 3731861, кл. НО5к 3/18, заявл. 16.04.1971, опубл. 25.08.1974.
7. Патент Австралии № 451925, кл. С08, В29с, заявл. 27.07.1971, опубл. 05.08.1974.
8. **Борыняк, Л.** Исследование повышения адгезии многослойных металлизационных покрытий к диэлектрическим подложкам гибридных интегральных схем / Л. Борыняк, Ю. Непочатов // Технологии в электронной промышленности. – 2007. – № 5. – С. 67–71.
9. **Зимон, А. Д.** Адгезия пленок и покрытий / А. Д. Зимон. – М. : Химия, 1977. – 351 с.
10. **Маслов, Е. Н.** Теоретические основы процесса царапания металлов / Е. Н. Маслов. – М. : Наука, 1968. – С. 24–44.
11. **Akira Kinbara** Adhesion measurement of thin films on glass substrates by scratch method / Akira Kinbara, Shigeru Baba, Eiji Kusano // Coatings Glass. – 1999. – P. 218–222.

References

1. Martynenko V. A., Chumakov G. D. *Silovaya elektronika* [Power electronics]. 2005, no. 1, pp. 8–10.
2. Chibirkin V. V., Martynenko V. A., Khapugin A. A., Konuchov A. V., Tundykov S. A., Grishanin A. V., Enikeev R. Sh., Serebrov R. A. *PCIM-Europe 2011, 17–19 May 2011.* Nuremberg, Germany, 2011, pp. 640–645.

3. Galakhov I. V., Kopelovich E. A., Martynenko V. A. et al. *28th ICPIG, July 15–20, 2007*. Prague, Czech Republic, 2007.
4. Russian certificate of authorship № 362356, cl. NO1S 14/00 S23s 13/02, submitted on 16.04.1970, *published on* 18.12.1972.
5. FRG application № 1521153, cl. 486 13/08, S23s 13/02, *submitted on* 07.08.1969; *published on* 07.02.1974.
6. Patent USA № 3731861, kl. NO5k 3/18, *submitted on* 16.04.1971; *published on* 25.08.1974.
7. Patent Australia № 451925, kl. S08, V29s, *submitted on* 27.07.1971; *published on* 05.08.1974.
8. Borynyak L., Nepochatov Yu. *Tekhnologii v elektronnoy promyshlennosti* [Technologies in electronics industry]. 2007, no. 5, pp. 67–71.
9. Zimon A. D. *Adgeziya plenok i pokrytiy* [Film and surface adhesion]. Moscow: Khimiya, 1977, 351 p.
10. Maslov E. N. *Teoreticheskie osnovy protsessa tsarapaniya metallov* [Theory of metal scratching process]. Moscow: Nauka, 1968, pp. 24–44.
11. Akira Kinbara, Shigeru Baba, Eiji Kusano *Coatings Glass*. 1999, pp. 218–222.

Нищев Константин Николаевич
кандидат физико-математических наук, доцент, директор Института физики и химии, Мордовский государственный университет имени Н. П. Огарева (Россия, г. Саранск, ул. Большевистская, 68)

E-mail: nishchev@inbox.ru

Nishchev Konstantin Nikolaevich
Candidate of physical and mathematical sciences, associate professor, director of the Institute of physics and chemistry, Mordovia State University named after N. P. Ogarev
(68 Bolshevistskaya street, Saransk, Russia)

Мартыненко Валентин Александрович
главный инженер, научно-инженерный центр силовых полупроводниковых приборов, ОАО «Электровыпрямитель» (Россия, г. Саранск, ул. Пролетарская, 126)

E-mail: martin@moris.ru

Martynenko Valentin Aleksandrovich
Chief engineer of Scientific Engineering Center of Power Semiconductor Devices, JSC «Electrovipryamitel»
(126 Proletarskaya street, Saransk, Russia)

Беглов Владимир Иванович
кандидат физико-математических наук, доцент, кафедра теоретической физики, Мордовский государственный университет имени Н. П. Огарева (Россия, г. Саранск, ул. Большевистская, 68)

E-mail: begvi1@mail.ru

Beglov Vladimir Ivanovich
Candidate of physical and mathematical sciences, associate professor, subdepartment of theoretical physics, Mordovia State University named after N. P. Ogarev
(68 Bolshevistskaya street, Saransk, Russia)

Гришанин Алексей Владимирович
начальник отдела биполярных силовых полупроводниковых приборов, ОАО «Электровыпрямитель» (Россия, г. Саранск, ул. Пролетарская, 126)

E-mail: grav82@list.ru

Grishanin Aleksey Vladimirovich
Chief of Bipolar Devices Department, JSC «Electrovipryamitel»
(126 Proletarskaya street, Saransk, Russia)

Елисеев Вячеслав Васильевич
кандидат технических наук, заместитель генерального директора, ОАО «Электровыпрямитель» (Россия, г. Саранск, ул. Пролетарская, 126)

E-mail: martin@moris.ru

Eliseev Vyacheslav Vasil'evich
Candidate of engineering sciences, deputy general manager, JSC "Electrovipryamitel" (126 Proletarskaya street, Saransk, Russia)

Малыгин Михаил Юрьевич
инженер-конструктор отдела биполярных силовых полупроводниковых приборов, ОАО «Электровыпрямитель» (Россия, г. Саранск, ул. Пролетарская, 126)

E-mail: grav82@list.ru

Malygin Mikhail Yur'evich
Design Engineer of Bipolar Devices Department, JSC "Electrovipryamitel" (126 Proletarskaya street, Saransk, Russia)

Новопольцев Михаил Ильич
кандидат физико-математических наук, доцент, кафедра общей физики, Мордовский государственный университет имени Н. П. Огарева (Россия, г. Саранск, ул. Большевистская, 68)

E-mail: nishchev@inbox.ru

Novopol'tsev Mikhail Il'ich
Candidate of physical and mathematical sciences, associate professor, sub-department of general physics, Mordovia State University named after N. P. Ogarev (68 Bolshevistskaya street, Saransk, Russia)

Юдин Вячеслав Александрович
кандидат физико-математических наук, доцент, кафедра физики твердого тела, Мордовский государственный университет имени Н. П. Огарева (Россия, г. Саранск, ул. Большевистская, 68)

E-mail: nishchev@inbox.ru

Yudin Vyacheslav Aleksandrovich
Candidate of physical and mathematical sciences, associate professor, sub-department of solid body physics, Mordovia State University named after N. P. Ogarev (68 Bolshevistskaya street, Saransk, Russia)

УДК 538.975

Исследования свойств многослойной металлизации структур «кремний на молибдене», полученной методом магнетронного распыления / К. Н. Нищев, В. А. Мартыненко, В. И. Беглов, А. В. Гришанин, В. В. Елисеев, М. Ю. Малыгин, М. И. Новопольцев, В. А. Юдин // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Физико-математические науки. – 2013. – № 3 (27). – С. 248–260.