

**ГОРБУНОВ Д. С., МИШКИН В. П., НИЩЕВ К. Н.,  
НОВОПОЛЬЦЕВ М. И., УСКОВА Е. Н.**

**ИССЛЕДОВАНИЕ СТРУКТУРЫ МНОГОСЛОЙНЫХ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ  
ПОКРЫТИЙ НА КРЕМНИИ МЕТОДАМИ РЭМ И СЗМ**

**Аннотация.** Методом химического травления, травления фокусированным ионным пучком, растровой электронной микроскопии и сканирующей зондовой микроскопии определена структура и элементный состав многослойных металлических покрытий, используемых в качестве переходного омического интерфейса в контактной системе структур мощных силовых полупроводниковых приборов. Исследуемые металлические покрытия наносились на поверхность кремниевых структур по технологии магнетронного напыления. Полученные результаты демонстрируют эффективность совместного применения методов химического и ионного травления, РЭМ и СЗМ для исследования структуры и элементного состава многослойных металлических покрытий на кремнии.

**Ключевые слова:** силовые полупроводниковые приборы, межэлементные соединения, структура «кремний на молибдене», многослойные металлические покрытия, растровая электронная микроскопия, сканирующая зондовая микроскопия.

**GORBUNOV D. S., MISHKIN V. P., NISHCHEV K. N.,  
NOVOPOLTSEV M. I., USKOVA E. N.**

**A STUDY OF THE STRUCTURE OF MULTILAYER METALLIC  
COATINGS ON SILICON BY SEM AND AFM**

**Abstract.** The structure and elemental composition of the multilayer metallic coatings used as a transition of the ohmic contact interface system structures of large power semiconductor devices have been identified by chemical etching, etching by focused ion beam, scanning electron microscopy, scanning probe microscopy. The metal coatings were deposited on the surface of the silicon structures by the magnetron sputtering technique. The results demonstrate the efficiency of the combined application of chemical and ion etching, SEM and AFM to study the structure and elemental composition of multilayer metal coatings on silicon.

**Keywords:** power semiconductor devices, interconnections, the structure "silicon-on-molybdenum", multilayer metallic coatings, scanning electron microscopy, scanning probe microscopy.

Основные параметры силовых полупроводниковых приборов (СПП) и их надежность в значительной степени определяются технологией межэлементных соединений и сборки в корпус электрически активных функциональных элементов. Межэлементные соединения в

СПП должны обладать необходимым сочетанием свойств: минимальными электрическими и тепловыми сопротивлениями, низкой индуктивностью, способностью быстро отводить возникающие в полупроводниковых структурах потери мощности без заметной разницы температур на полупроводниковом элементе и поверхности корпуса, обеспечивать механическую прочность приборов в широком диапазоне температур и циклических нагрузках мощности. Обычно применяемые для соединения элементов СПП технологии (пайка мягкими припоями, сплавление высокотемпературными припоями, технология прижимных контактов) уже не удовлетворяют постоянно растущим требованиям к техническим параметрам и надежности мощных СПП. Поэтому в настоящее время весьма актуален поиск новых способов соединения элементов в структурах СПП.

В качестве одной из наиболее перспективных рассматривается технология низкотемпературного соединения (Low-Temperature Joint Technique – LTJT) с использованием спеченных мелкодисперсных частиц серебра. Высокие значения электропроводности и теплопроводности серебра, обеспечивают повышение тепловых и электрических характеристик приборов, а сравнительно низкие температуры спекания обеспечивает структурам СПП необходимую механическую прочность и высокую надежность. Процесс LTJT представляет собой технологический способ получения структур «кремний на молибдене» (КНМ) – соединения кремниевой структуры, содержащей p-n-переходы, с молибденовым термокомпенсатором посредством спекания (sintering – синтеринг) с применением специальных серебрясодержащих паст, при воздействии температуры и давления [1-3]. Структура КНМ является основным активным элементом, определяющим выходные электрические и тепловые параметры СПП. Термокомпенсаторы служат для отвода тепловых потерь от кремниевой структуры. Их температурный коэффициент расширения должен быть близким к коэффициенту кремния во всем диапазоне температурных изменений, имеющих место при производстве и последующей эксплуатации СПП.

Одним из ключевых элементов технологии низкотемпературного соединения с использованием серебрясодержащих паст является металлизация соединяемых поверхностей кремниевых структур и молибденовых термокомпенсаторов (МТ). Процесс формирования металлизации не должен ухудшать характеристики кремниевых кристаллов СПП. Технологический процесс металлизации контактных поверхностей кремниевых пластин и молибденовых термокомпенсаторов обычно состоит из следующих операций:

- очистка поверхности кремниевых пластин (КП) и молибденовых термокомпенсаторов (МТ);
- нанесение слоев металлизации на КП и МТ;

- вжигание напыленных слоев металлизации;
- контроль качества металлизации.

Процесс нанесения тонких слоев заданной толщины и состава является наиболее важной операцией при создании многослойной металлизации КП и металлизации серебром МТ. Качество металлизации зависит от подготовки поверхностей, на которые наносится слои металлов, а также от метода нанесения металлических слоев.

В настоящей работе представлены результаты исследования структуры и элементного состава многослойной металлизации кремниевой структуры, предназначенной для низкотемпературного спекания с молибденовым компенсатором. Для последовательного нанесения тонких металлических слоев на кремниевую подложку использовалась технология магнетронного напыления. Исследования структуры и элементного состава многослойной металлизации кремниевой структуры проводились нами на растровом электронном микроскопе с системой фокусированного ионного пучка Quanta 200 i 3D FEI и сканирующем зондовом микроскопе SPM 9600 SHIMADZU.

На рис. 1 и 2 представлены типичные изображения внешней поверхности многослойной металлизации кремниевой структуры, полученные методами РЭМ и СЗМ.

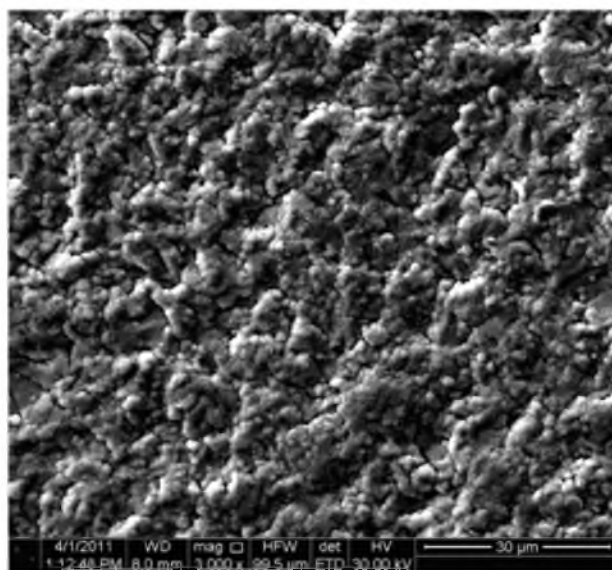


Рис. 1. РЭМ-изображение внешней поверхности многослойной металлизации кремниевой структуры. Увеличение 3000х, ускоряющее напряжение 30 кВ.

Как следует из рис.1 и 2, методом магнетронного напыления удастся получать морфологически однородные металлические слои, состоящие из зерен микронного размера, форма которых близка к сферической.

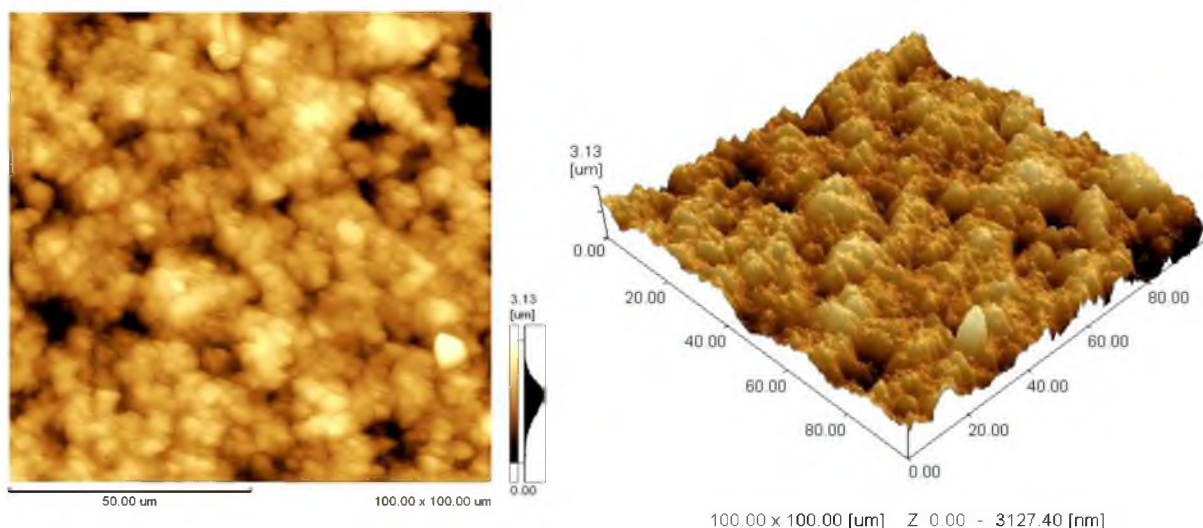


Рис. 2. СЗМ-изображения внешней поверхности многослойной металлизации кремниевой структуры. Размер скана 100х100 мкм.

Для выявления структуры многослойной металлизации и определения элементного состава металлических слоев нами использовались метод селективного химического травления и метод травления поверхности металлизированной кремниевой структуры сфокусированным ионным пучком в колонне РЭМ. Химическому травлению подвергалась открытая часть поверхности исследуемого образца, другая часть поверхности была защищена химически стойким лаком (ХСЛ). Для химического травления использовался травитель состава:  $\text{HNO}_3$  (концентр.) +  $\text{HF}$  (5%) в соотношении 1:1. Время травления составляло 3 мин, температура травления  $25^\circ\text{C}$ . После травления образец промывался в растворе  $\text{NH}_4\text{OH}$  с добавлением  $(\text{NH}_4)_2\text{CO}_3$ .

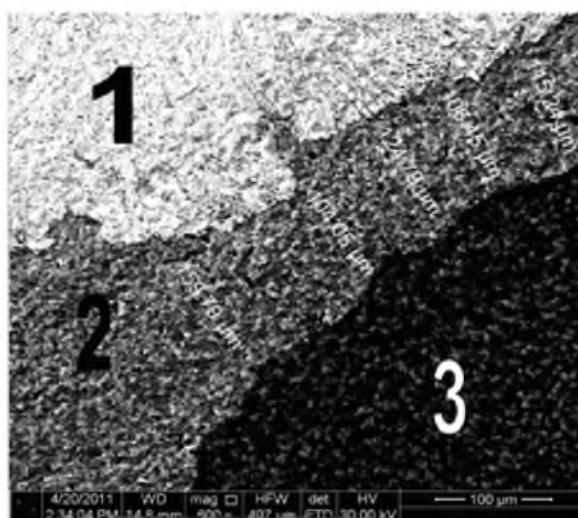


Рис. 3. РЭМ-изображение поверхности металлизированной кремниевой структуры после ее химического травления в смеси  $\text{HNO}_3$  (концентр.) и  $\text{HF}$  (5%). Время травления 3 мин, температура  $25^\circ\text{C}$ .

На рис. 3 представлено РЭМ-изображение поверхности металлизированной кремниевой структуры после ее химического травления. Как видно из рис.3, в результате воздействия вышеуказанным травителем на незащищенную ХСЛ часть поверхности исследуемого образца в ней была выявлена переходная область шириной порядка 120 мкм, обнажившая внутренние слои металлизации. Используя энергодисперсионную рентгеноспектральную приставку РЭМ Quanta 200 i 3D FEI, нами был проведен локальный микроанализ элементного состава выявленных травлением внутренних слоев металлизации.

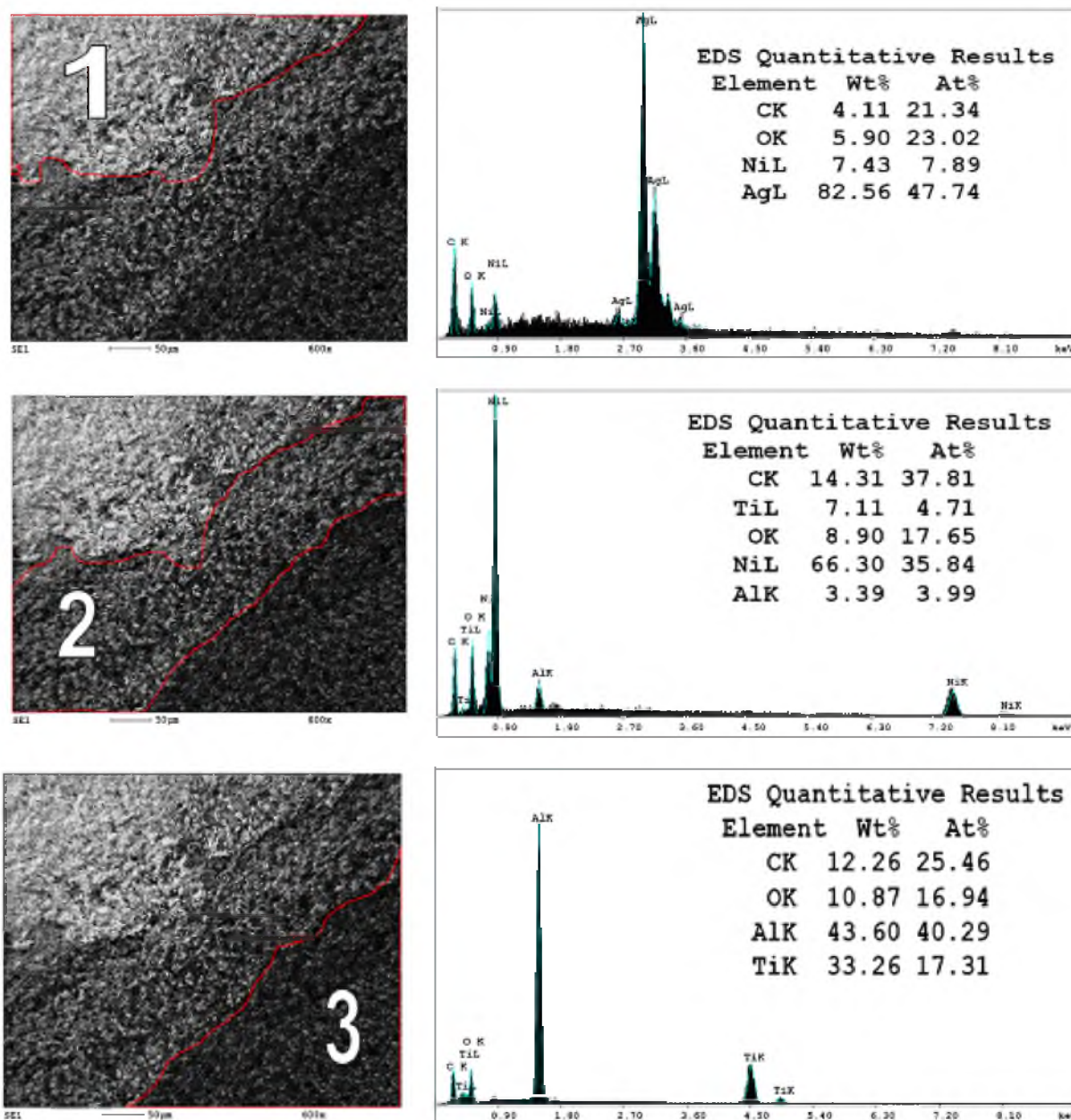


Рис. 4. Элементный состав многослойного покрытия кремниевой структуры по данным энергодисперсионного рентгеновского микроанализа.

При этом было обнаружено, что преобладающим элементом в составе области 1 многослойного покрытия является серебро (48 ат.%), преобладающими элементами в составе области 2 является никель (36 ат.%) и титан (5%). В составе области 3 (прилегающей к кремнию) присутствуют алюминий (40 ат.% ) и титан (17 ат. %). Таким образом, результаты химического травления и энергодисперсионного рентгеновского микроанализа металлизированной кремниевой структуры подтвердили заданную при изготовлении последовательность металлических слоев покрытия.

Толщина поверхностного слоя серебра определялась с использованием технологии травления фокусированным ионным пучком (ФИП) в колонне РЭМ Quanta 200 i 3D, а также методом сканирующей зондовой микроскопии. На рис. 5. представлено РЭМ-изображение поперечного сечения металлического покрытия кремниевой структуры после травления фокусированным ионным пучком. Ионное травление металлического покрытия кремниевой структуры проводилось на торце исследуемого образца. Как видно из рис. 5, толщина поверхностного слоя серебра в выбранной области покрытия варьировалась в интервале от 1,5 до 1,75 мкм.

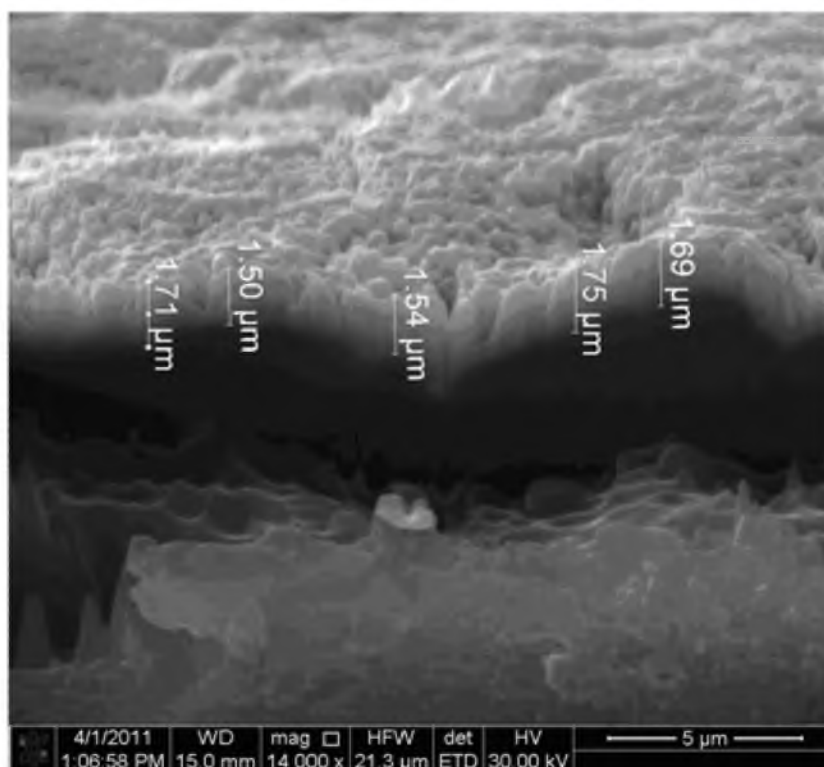


Рис. 5. РЭМ-изображение поперечного сечения поверхностного слоя металлического покрытия кремниевой структуры, полученного с использованием функции фокусированного ионного пучка.

На рис. 6 представлены СЗМ-изображения границы раздела областей 1 и 2 (рис. 2) поверхности многослойного металлического покрытия кремниевой структуры после

химического травления по технологии, описанной выше. Перепад высот внешних поверхностей металлических слоев в области 1 (Ag) и в области 2 (Ni), определенный по данным СЗМ, составил 1,8 мкм, что, с учетом шероховатости поверхностей, соответствует результатам, полученным с использованием ФИП.

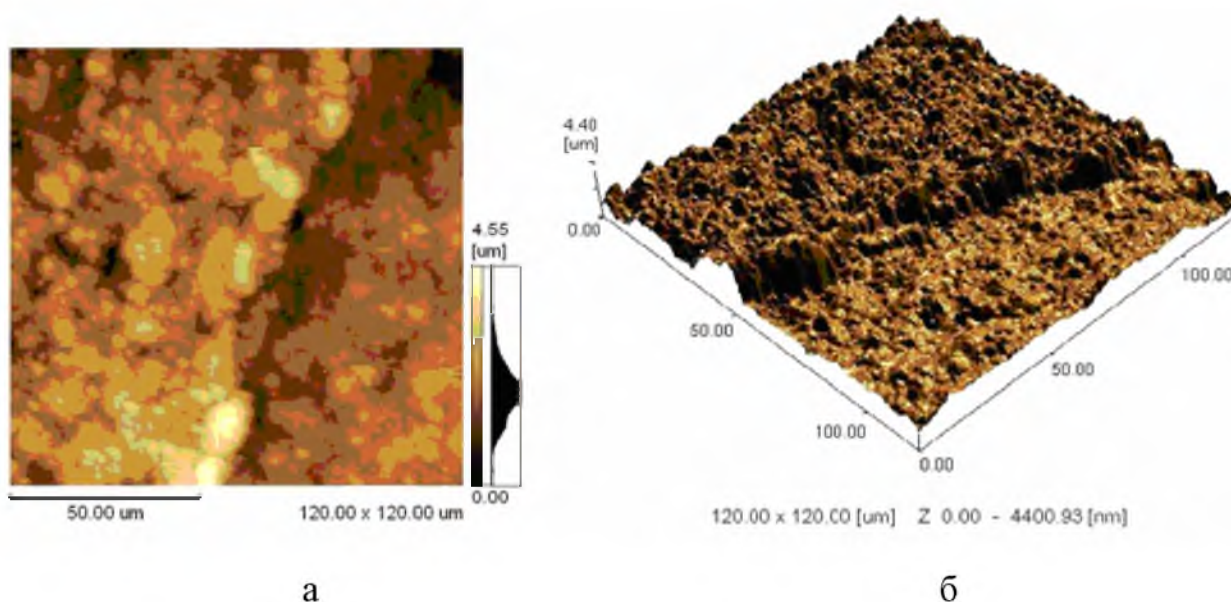


Рис.6. СЗМ-изображения границы раздела областей 1 и 2 (рис.2) поверхности многослойного металлического покрытия кремниевой структуры после химического травления.

Размер скана 120x120мкм.

Таким образом, приведенные выше результаты демонстрируют эффективность применения методов химического и ионного травления в сочетании с РЭМ и СЗМ для исследования структуры и элементного состава многослойных металлических покрытий на кремнии.

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.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Fellenger J., Baumgartner W. Patentschrift – DE 3414065 C2. Deutsches Patentamt. – 1989.
2. Schwarzbauer H., Europäische Patentschrift EP 0 242 626 B1. Europäisches Patentamt. – 1991.
3. Schwarzbauer H., Kuhnert R. Novel Large Area Joining Technique for Improved Power Device Performance. In: IEEE Trans. Ind. Appl. – 1991. – Vol. 27. – № 1. – pp. 93-95.