

## ИССЛЕДОВАНИЕ ВОЗМОЖНОСТИ СНИЖЕНИЯ СОПРОТИВЛЕНИЯ КОНТАКТОВ И МЕЖСОЕДИНЕНИЙ ФОРМИРОВАНИЕМ ДВУХСЛОЙНЫХ W/WSi<sub>x</sub> ЭЛЕКТРОДОВ ЗАТВОРА

<sup>1</sup>Черкесова Н.В. \*, <sup>1</sup>Мустафаев Г.А., <sup>2</sup>Мустафаев А.Г.

<sup>1</sup>*Кабардино-Балкарский государственный университет им. Х.М. Бербекова*

<sup>2</sup>*Дагестанский государственный университет народного хозяйства*

\*natasha07\_2002@mail.ru

*В работе для формирования низкоомных электродов затвора полевого транзистора с использованием тугоплавких металлов разработана технология самосовмещенных структур для схем на основе GaAs и исследованы структуры двухслойных W/WSi<sub>x</sub> электродов затвора, также проведена оптимизация толщины слоя WSi<sub>x</sub>. Показано, что сочетание двухслойной W/WSi<sub>x</sub> структуры обеспечивает низкое сопротивление контактов и межсоединений.*

**Ключевые слова:** термостабильность, пленка, коэффициент неидеальности, силицид тугоплавких металлов, высота барьера, толщина слоя, механические напряжения, удельное сопротивление, адгезия, диффузия.

## RESEARCH OF THE POSSIBILITY OF REDUCING THE CONTACTS AND INTERCONNECTS RESISTANCE BY FORMING TWO-LAYER W/WSi<sub>x</sub> GATE ELECTRODES

<sup>1</sup>Cherkesova N.V., <sup>1</sup>Mustafaev G.A., <sup>2</sup>Mustafaev A.G.

<sup>1</sup>*Kabardino-Balkarian State University*

<sup>2</sup>*Dagestan State University of National Economy*

*In the work for the formation of low-resistance gate electrodes of a field-effect transistor using refractory metals, a technology of self-displaced structures for GaAs-based circuits was developed and the structures of two-layer W/WSi<sub>x</sub> gate electrodes were studied, and the thickness of the WSi<sub>x</sub> layer was also optimized. This article shows that the combination of a two-layer W/WSi<sub>x</sub> structure provides a low resistance to contacts and interconnects.*

**Keywords:** thermal stability, films, imperfection coefficient, silicides of refractory metals, barrier height, layer thickness, mechanical stresses, resistivity, adhesion, diffusion.

### Введение

По мере уменьшения размеров элементов ИС возрастают требования по снижению удельного сопротивления материалов, используемых в качестве контактов и межсоединений. Применение поликремния и различных силицидов металлов не удовлетворяет технологов, в связи с чем возрос интерес к использованию для этих целей таких тугоплавких металлов, как Мо и W [1–5].

Для формирования низкоомных электродов затвора полевого транзистора (ПТ) с использованием тугоплавких металлов разработали технологию самосовмещенных структур для быстродействующих БИС на основе GaAs. В работе исследованы структуры двухслойных W/WSi<sub>x</sub> электродов затвора. Контакты WSi<sub>x</sub>/GaAs обладают характеристиками барьера Шоттки, сохраняющимися даже после высокотемпературного отжига; удельное сопротивление WSi<sub>x</sub> относительно высокое ~ 150 мкОм·см, а удельное сопротивление пленок W составляет около 13 мкОм·см. Сочетание этих двух материалов должно обеспечить низкое сопротивление контактов и межсоединений. В работе также проведена в части механических напряжений.

### Результаты и обсуждение

Структуры W/WSi<sub>x</sub> формировали путем последовательного напыления в магнетронной установке [6]. Перед началом процесса проводили тщательное обезгаживание рабочей камеры: ее объем откачивали до остаточного давления 10<sup>-5</sup> Па и держатель подложки нагревали до температуры 200 °С. Слои WSi<sub>x</sub> формировали с помощью чередующегося напыления из отдельных мишеней (WSi<sub>0,6</sub> и Si); подбор электрической мощности для каждой мишени обеспечивал необходимое содержание Si в многослойной пленке WSi<sub>x</sub> [7].

Измерения напряжений проводили при комнатной температуре на пластинах GaAs до и после отжига. На *рис. 1* показана зависимость напряжений в пленке WSi<sub>0,4</sub> от ее толщины – до отжига (1) и после отжига при температуре 800 °С (2) в течение 20 мин в атмосфере H<sub>2</sub> с пассивирующей пленкой Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>.

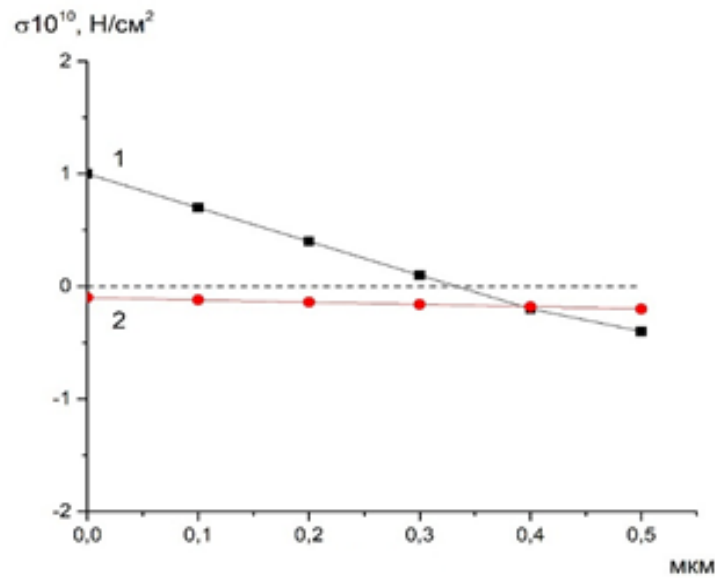


Рис. 1. Зависимость напряжений в пленке WSi<sub>0,4</sub> от ее толщины: 1 – до отжига и 2 – после отжига при температуре 800 °С в течение 20 мин в атмосфере H<sub>2</sub>

Содержание Si в WSi<sub>x</sub> является важным фактором обеспечения термостабильности барьера Шоттки [8], 0,4 обеспечивает оптимальные характеристики барьера Шоттки при наименьших напряжениях после отжига. Свойства пленок зависят также от конструкции распылительной системы и условий их формирования (например, от давления Ar). На *рис. 2* показана зависимость коэффициента неидеальности (1) и высоты барьера Шоттки (2) от содержания Si<sub>x</sub>.

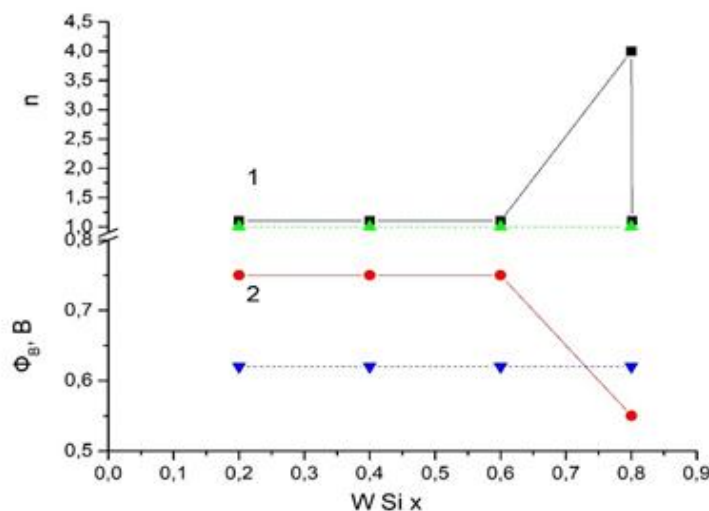
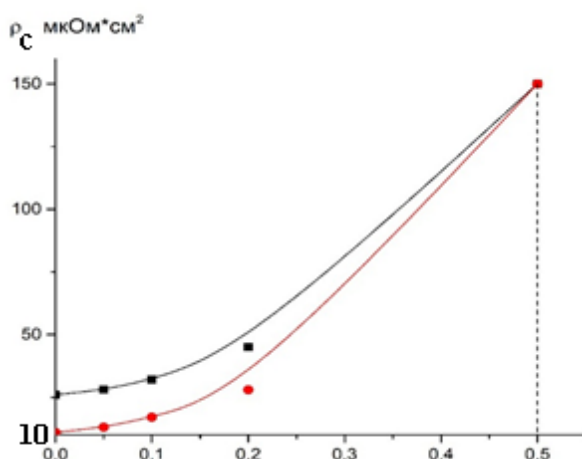


Рис. 2. Зависимость коэффициента неидеальности (1) и высоты барьера Шоттки (2) от содержания Si<sub>x</sub> после отжига при температуре 800 °С (пунктирная линия – до отжига)

Как видно из *рис. 2*, при значениях  $x=0,2-0,6$  обеспечиваются стабильные характеристики с низким значением коэффициента идеальности и высокими значениями барьера Шоттки. Если рассматривать физические явления, на поверхности раздела  $W\text{Si}_x/\text{GaAs}$  обнаруживается некоторая нестабильность. Так, при  $x=0,2$  в процессе изготовления приборов наблюдается потеря адгезии. При  $x=0,8$  на поверхности  $\text{GaAs}$  под пленкой  $W\text{Si}_x$  после отжига при температуре  $800\text{ }^\circ\text{C}$  появляются ямки травления: при  $x=0,6$  подобные ямки обнаруживаются по периферии контакта. В случае  $x=0,4$  отсутствуют как ямки травления, так и потеря адгезии; поэтому в настоящей работе был выбран состав  $W\text{Si}_{0,4}$ . По-видимому, этот эффект обусловлен миграцией  $\text{Ga}$  либо  $\text{As}$  в  $W\text{Si}_x$  в процессе отжига при  $800\text{ }^\circ\text{C}$ . Данные исследования образцов с помощью вторичной ионной масс-спектрометрии (ВИМС) свидетельствуют о значительном содержании  $\text{Ga}$  и  $\text{As}$  в  $W\text{Si}_x$  при  $x=0,8$ ; уровни интенсивности для  $\text{Ga}$  и  $\text{As}$  в слое  $W\text{Si}_x$  при  $x=0,4$  оказываются на порядок величины меньше.

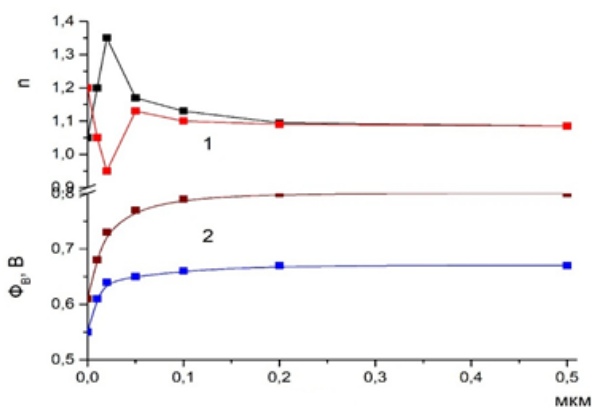
На *рис. 3* показана зависимость удельного сопротивления двухслойной пленки  $W/W\text{Si}_{0,4}$  от толщины нижнего слоя (при суммарной толщине  $500\text{ нм}$ ) без отжига (верхняя) и после отжига при температуре  $800\text{ }^\circ\text{C}$  (нижняя).



*Рис. 3.* Зависимость удельного сопротивления двухслойной пленки  $W/W\text{Si}_{0,4}$  от толщины нижнего слоя  $W\text{Si}_{0,4}$ , верхняя без отжига, нижняя после отжига при температуре  $800\text{ }^\circ\text{C}$

Сопротивление слоя  $W$  в результате отжига снижается с  $17\text{ мкОм}\cdot\text{см}$  до  $13\text{ мкОм}\cdot\text{см}$ , чем и объясняется уменьшение сопротивления двухслойной пленки. Сопоставление измеренных значений с расчетными данными позволяет считать, что в процессе отжига диффузия  $W$  и  $\text{Si}$  между слоями незначительна и в итоге два слоя работают как два параллельных проводника.

На *рис. 4* показана зависимость коэффициента неидеальности (1) и высоты барьера Шоттки (2) от толщины слоя  $W\text{Si}_{0,4}$  без отжига и после отжига при температуре  $800\text{ }^\circ\text{C}$ . При толщине слоя  $W\text{Si}_{0,4}$  больше  $100\text{ нм}$  отжиг обеспечивает высокие значения барьера Шоттки и малые значения коэффициента идеальности. При толщине слоя  $W\text{Si}_{0,4}$  менее  $50\text{ нм}$  высота барьера уменьшается и коэффициент неидеальности оказывается нестабильным – это, по-видимому, связано с верхним слоем  $W$ , поскольку такое поведение характерно именно для контактов типа  $W/\text{GaAs}$ .



*Рис. 4.* Зависимость коэффициента неидеальности (1) и высоты барьера Шоттки (2) от толщины слоя  $W\text{Si}_{0,4}$  (при суммарной толщине  $500\text{ нм}$ ): без отжига (красная линия и синяя) и после отжига при температуре  $800\text{ }^\circ\text{C}$  (темные линии)

### **Выводы**

По свойствам барьера Шоттки (включая его стабильность) и требованиям низкого сопротивления, для технологии БИС можно рекомендовать двухслойные пленки W/WSi<sub>0,4</sub> с толщиной нижнего слоя 100 при полной толщине 500 нм. Самосовмещенные структуры ПТ с двухслойными W/WSi<sub>0,4</sub> и однослойными WSi<sub>0,4</sub> затворами, при длине и ширине электрода затвора 1,0 мкм и 5 мкм, соответственно, показали, что зависимости динамической проводимости от порогового напряжения практически идентичны распределению результатов. В экспериментах получены также одинаковые зависимости порогового напряжения от длины электрода затвора для приборов с двухслойными и однослойными электродами. Это означает отсутствие сколько-нибудь заметной деградации характеристик ПТ при использовании двухслойной структуры W/WSi<sub>0,4</sub> с указанными параметрами слоев.

### **Библиография**

1. Qu X.-P., Lu H., Peng T., Ru G.-P., Li B.-Z. Effects of preannealing on the diffusion barrier properties for ultrathin W-Si-N thin film // *Thin Solid Films*. 2004. V. 67. P. 462–463.
2. Babbar H.L., Anagnostopoulos C.N., Fischer J.R. Al SiO<sub>2</sub>/WSi<sub>2</sub>/Si double-level metallization for charge-coupled-device imagers // *Journal of Vacuum Science & Technology B: Microelectronics and Nanometer Structures*. 1985. V. 3, N 6. P.1645–1649.
3. Плющева С.В., Михайлов Г.М., Шабельников Л.Г., Шаповал С.Ю. Образование силицидов на межфазной границе при осаждении тонких слоев вольфрама на кремний // *Неорганические материалы*. 2009. Т. 45, № 2. С. 176–180.
4. Mustafaev G.A., Khasanov A.I., Cherkesova N.V., Mustafaev A.G. Technology for the formation of refractory metals for micro – and nanoelectronics products // *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 3rd International Symposium on Engineering and Earth Sciences (ISEES 2020). 2020. P. 12048.
5. Мустафаев Г.А., Черкесова Н.В., Хасанов А.И., Мустафаев А.Г., Формирование малоразмерных контактов на основе слоя вольфрама // *Материалы Международной научно-практической конференции «Современные методы исследования и диагностики поверхности»*. Грозный. 2021, С. 65–70.
6. Патент РФ № 2698540. Способ изготовления контактно-барьерной металлизации / Г.А. Мустафаев, А.Г. Мустафаев, А.Г. Мустафаев. Заявл. 17.10.2018. Опубликовано 28.08.2019. Бюл. № 13.
7. Патент РФ № 2757177 Способ изготовления силицидных контактов из вольфрама / Г.А. Мустафаев, А.И. Хасанов, А.Г. Мустафаев, Н.В. Черкесова, А.Г. Мустафаев. Заявл. 15.02.2021. Опубликовано 11.10.2021. Бюл. № 29.
8. Мустафаев Г.А., Черкесова Н.В. Силициды тугоплавких металлов для изделий микро- и нанoeлектроники: учебное пособие. Нальчик, 2021. 95 с.