

## ИССЛЕДОВАНИЕ ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКИХ СВОЙСТВ КОМПОЗИТА ЖЕЛЕЗО – КАРБИД ВОЛЬФРАМА

**А. П. Королев, А. Д. Лоскутова**

*Кафедра «Материалы и технология», ФГБОУ ВО «ТГТУ», г. Тамбов, Россия;  
korolevanpal@yandex.ru*

**Ключевые слова:** композитный материал; температурная зависимость удельного сопротивления; электропроводность.

**Аннотация:** Исследованы электрофизические свойства композитного материала железо – карбид вольфрама, которые определяются величиной удельной проводимости, изменяющейся в зависимости от внешних факторов. Приведены результаты исследования температурной зависимости удельного сопротивления указанного композита, и теоретически проанализированы электрофизические процессы в материале при изменении температуры. Предложена технология получения композитного материала железо – карбид вольфрама.

---

Материалы, применяемые в электронике и электротехнике, по своим электротехническим, механическим, эксплуатационным свойствам и назначению подразделяются на различные группы. Проводящие материалы (проводники и полупроводники) в зависимости от назначения и условий эксплуатации должны обладать рядом характеристик, необходимых для выполнения своих функций с требуемой точностью и стабильностью. От таких материалов в различных условиях наряду с высокой электропроводностью могут потребоваться повышенная прочность, стойкость к воздействию окружающей среды и другие особые свойства, необходимые для эксплуатации компонентов и элементов электронной и электрической техники в тяжелых условиях. Одной из групп перспективных электротехнических материалов для производства компонентов электронных средств являются композитные материалы.

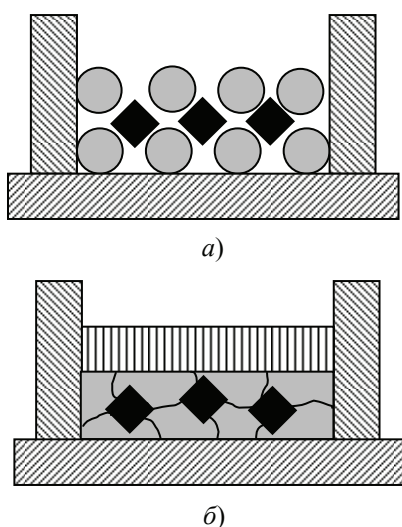
Широкое распространение в электронике в настоящее время имеют карбиды. Например, хорошо известен полупроводниковый материал карбид кремния SiC, обладающий рядом ценных полупроводниковых свойств. В связи с тем, что в современном мире проводятся исследования по созданию композитных проводящих материалов, обладающих специальными свойствами, могут представлять интерес и карбиды металлов. Например, сплав системы W–C в основном применяется как конструкционный и материал для изготовления инструмента. Но, возможно, это его не единственное применение. Интересными являются исследования его электрофизических свойств в составе композитного материала с металлом. Для создания композита карбида вольфрама с другим металлом необходимо изучить строение и свойства самого карбида.

Карбид вольфрама имеет высокую стойкость к температуре, воздействию атмосферы и процессам окисления, а высокая твердость и износостойкость сплавов системы W–C позволяет использовать их для изготовления токоведущих частей, работающих в тяжелых механических условиях (при трении, ударах и т.д.).

Карбиды вольфрама имеют гексагональную или кубическую в зависимости от соотношения атомов W и C кристаллическую решетку. В кубической модификации период решетки зависит от соотношения атомов. Период решетки в сочетании с некоторыми внутренними параметрами, обусловленными присутствием посторонних атомов, может влиять на величину электропроводности композита. Удельное сопротивление карбида вольфрама по литературным данным из различных источников составляет примерно  $1,9 \cdot 10^{-5}$  Ом·см, но это усредненное значение. Удельное сопротивление меди в отожженном состоянии при 20 °C составляет  $1,7241 \cdot 10^{-6}$  Ом·см. В любом случае удельное сопротивление сплавов системы W – C имеет величину, большую на порядок.

Сплавы системы W – C обладают небольшой нестехиометрией. Данный факт дает возможность изменяться удельному сопротивлению при изменении температуры аналогично изменениям в нестехиометрических композитных полупроводниковых терморезисторах. Добавление металла в композит со сплавом W–C может внести изменения в электрофизические свойства композитного материала. Для получения композитного материала на основе металла со сплавом системы W–C в качестве первого выбрано железо. Железо не относится к хорошим проводникам, таким как алюминий, медь и, тем более, благородные металлы. В связи с этим композит с железом может представлять бóльший интерес, чем с хорошим проводником.

Композитный материал железо – карбид вольфрама изготавливался методом прессования из порошков железа и карбида с последующим спеканием. В зависимости от пластичности частичек порошка опытным путем подбиралось усилие прессования. Следует отметить, что порошок W–C имеет очень низкую прессуемость и после снятия нагрузки прессуемый материал рассыпается. Железо играет роль связующего вещества, а карбид вольфрама является арматурой (рис. 1).



**Рис. 1. Композитный порошок железа и карбида вольфрама до (а) и после (б) прессования**

Порошок железа плохо перемешивается с порошком карбида. Поэтому в пресс-форму послойно с чередованием насыпали порошки железа и карбида вольфрама. Под давлением железо деформируется и обволакивает частички порошка карбида вольфрама. При этом устанавливаются молекулярные связи между железом и карбидом. После спекания получается сплав, образованный прочными атомарными связями. Температура спекания выбирается относительно температуры плавления железа и составляет 1100 °C. Для проведения эксперимента образцы сплава изготавливались в цилиндрической пресс-форме в виде таблеток диаметром 2,5 см и толщиной 0,2 см. Объемная доля вольфрама в композите – 20 %.

В эксперименте исследовалась зависимость величины удельного сопротивления от температуры. Для подтверждения результатов при одинаковых технологических

параметрах изготовлены десять образцов одинакового химического состава. Эксперимент проводился в электропечи в температурном диапазоне 20...110 °С. Результаты эксперимента приведены графически на рис. 2.

Значения удельного сопротивления на координатной плоскости нанесены усредненные по десяти образцам. Максимальный разброс значений составляет 10 %, что, скорее всего, связано с неоднородностью сплава после перемешивания порошков.

Результаты эксперимента показали, что температурная зависимость удельного сопротивления исследуемого композитного материала железо – карбид вольфрама имеет такой же вид, как у классического полупроводника – удельное сопротивление падает с ростом температуры. Температурный коэффициент сопротивления (ТКС) полупроводника отрицательный. Отличием от полупроводниковой характеристики является меньшая нелинейность зависимости на исследуемом интервале температур. Металлические проводники имеют положительный ТКС. Исследуемый композит формируется из двух составляющих – железа и карбида вольфрама, которые являются проводниками. И железо, и карбид вольфрама в отдельности имеют положительный ТКС, но композит обладает отрицательным ТКС подобно полупроводнику. Удельное сопротивление проводника в зависимости от температуры рассчитывается по формуле

$$\rho_t = \rho_{20}[1 + \alpha(t - 20)], \quad (1)$$

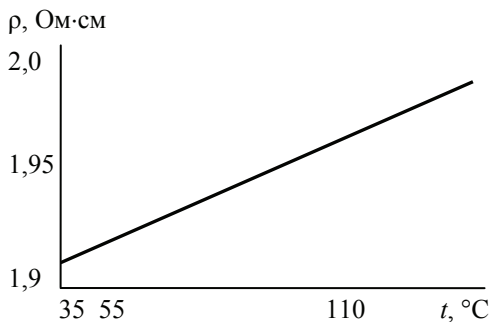
где  $\rho_{20}$  – удельное сопротивление при температуре 20 °С;  $\alpha$  – температурный коэффициент сопротивления;  $t$  – температура. Расчетная характеристика удельного сопротивления как функция температуры для карбида представлена на рис. 3.

Удельное сопротивление карбида вольфрама при температуре 20 °С составляет  $1,9 \cdot 10^{-5}$  Ом·см, температурный коэффициент удельного сопротивления  $0,495 \cdot 10^{-3}$  град<sup>-1</sup> в диапазоне 20...1500 °С.

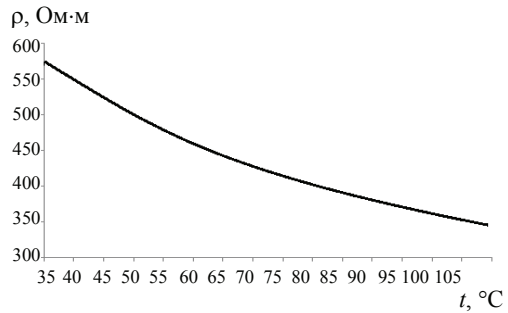
Удельное сопротивление кремния при 20 °С составляет  $2,3 \cdot 10^5$  Ом·см, что на десять порядков больше, чем у карбида вольфрама. Удельное сопротивление кремния зависит не только от температуры, но и от количества и типа примеси [1]. В отличие от проводника изменение удельного сопротивления полупроводника с изменением температуры связано с увеличением концентрации носителей зарядов электронов и дырок и уменьшением подвижности. Изменение концентрации носителей описывается выражением [1]

$$n_0 p_0 = N_V N_C \exp[-E_G / (kT)] = n_i^2, \quad (2)$$

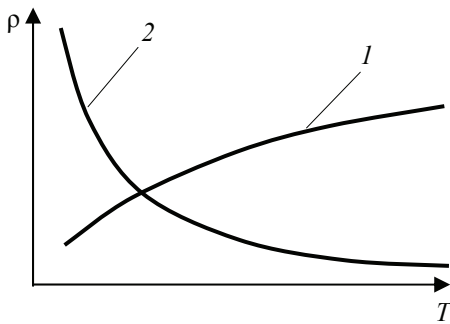
где  $n_0, p_0$  – полные концентрации электронов и дырок соответственно;  $N_V, N_C$  – концентрации энергетических уровней в валентной зоне и зоне



**Рис. 3. Зависимость удельного сопротивления карбида вольфрама от температуры**



**Рис. 2. Температурная зависимость удельного сопротивления композитного сплава железо – карбид вольфрама**



**Рис. 4. Температурные зависимости удельного сопротивления проводника (1) и полупроводника (2)**

ная зависимость удельного сопротивления композита карбида вольфрама и железа похожа на зависимость, убывающую как у классического полупроводника, но нелинейность гораздо меньше, что является большим преимуществом при создании термочувствительных элементов.

Температурная зависимость удельного сопротивления карбида вольфрама близка к линейной и является слабо возрастающей, а полупроводника – убывающей и сильно нелинейной.

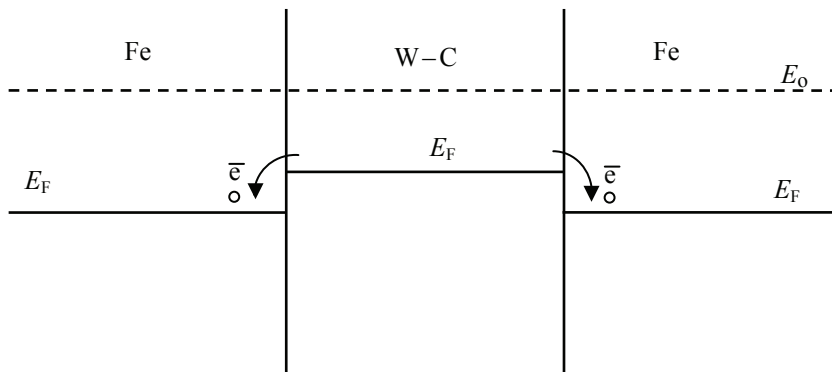
Микроструктура исследуемого композита представляет собой микроструктуру двухфазного сплава. Фаза карбид вольфрама обволакивается фазой железа. В этих фазах различаются работы выхода электронов [2, 3] (рис. 5).

Работа выхода электронов из карбида вольфрама составляет 3,6 эВ, из железа – 4,40...4,71 эВ. В состоянии сплава уровни Ферми выравниваются за счет перераспределения электронов между фазами. Электроны из карбида переходят в железо, что тоже влияет на величину удельного сопротивления. Перераспределение электронов в результате разницы работ выхода в фазах и нестехиометрического состава сплавов системы W–C придает композитному сплаву железо – карбид вольфрама некоторые полупроводниковые свойства, в частности отрицательный температурный коэффициент удельного сопротивления.

Карбиды металлов, в том числе и карбиды вольфрама, имеют высокую структурную (неэлектрическую) устойчивость к воздействиям температуры и агрессивных сред, высокую прочность и износостойкость. Данный сплав при использовании его в качестве электротехнического материала обладает высокими эксплуатационными свойствами. Отрицательный ТКС позволяет использовать его

проводимости соответственно;  $E_G$  – ширина запрещенной зоны;  $k$  – постоянная Больцмана;  $T$  – абсолютная температура;  $n_i$  – собственная концентрация носителей заряда.

Концентрация носителей с температурой увеличивается на несколько порядков, в то время как подвижность уменьшается в два-три раза. Поэтому на изменение удельного сопротивления подавляющее влияние оказывает изменение концентрации носителей. Схематично изменения удельного сопротивления карбида вольфрама и полупроводника изображены на рис. 4. Температурная



**Рис. 5. Фазы железа и карбида вольфрама:**  
 $E_0$  – уровень вакуума;  $E_F$  – уровень Ферми

как материал термочувствительного элемента с преимуществами перед терморезисторами по надежности, прочности, стабильности во времени, притом, что оксидные терморезисторы подвержены старению. Таким образом, композитный сплав железо – карбид вольфрама является перспективным материалом термочувствительных элементов.

#### *Список литературы*

1. Брусенцов, Ю. А. Исследование электрофизических процессов в полевых полупроводниковых структурах для измерения теплофизических характеристик / Ю. А. Брусенцов, А. В. Озаренко, А. П. Королев // Вестн. Тамб. гос. техн. ун-та. – 2006. – Т. 12, № 1А. – С. 122 – 128.
2. Королев, А. П. Размерное квантование в подзатворном слое полевой полупроводниковой структуры / А. П. Королев, В. А. Ершов // Вестн. Тамб. гос. техн. ун-та. – 2016. – Т. 22, № 1. – С. 108 – 113. doi: 10.17277/vestnik.2016.01.pp.108-113
3. Яцинин, Ю. В. Образование заряда в квантовой яме в полевой структуре / Ю. В. Яцинин, А. П. Королев // Вестн. Тамб. гос. техн. ун-та. – 2011. – Т. 17, № 2. – С. 525 – 528.

---

## **Investigation of Electrophysical Properties of the Iron-Tungsten Carbide Composite**

**A. P. Korolev, A. D. Loskutova**

*Department of Materials and Technology, TSTU, Tambov, Russia;  
korolevanpal@yandex.ru*

**Keywords:** composite material; electrical conductivity; temperature dependence of resistivity.

**Abstract:** In the present paper, the electrophysical properties of the iron-tungsten carbide composite material are studied. Its electrophysical properties are determined by the value of the specific conductivity, which can vary with the change of external factors. The paper presents the results of the investigation of the temperature dependence of the resistivity of this composite. The theoretical analysis of the electrophysical processes in the material with a temperature change is made. The technology of obtaining the iron-tungsten carbide composite material is proposed.

#### *References*

1. Brusentsov Yu.A., Ozarenko A.V., Korolev A.P. [Research into Electrophysical Processes in Field Semiconductor Structures for Measuring Thermo-Physical Characteristics], *Transactions of Tambov State Technical University*, 2006, vol. 12, no. 1A, pp. 122-128. (In Russ., abstract in Eng.)
2. Korolev A.P., Ershov V.A. [Size Quantization in Under the Gate Region of Field-Effect Semiconductor Structures], *Transactions of Tambov State Technical University*, 2016, vol. 22, no. 1, pp. 108-113. doi: 10.17277/vestnik.2016.01.pp.108-113 (In Russ., abstract in Eng.)
3. Yatsinin Yu.V., Korolev A.P. [Formation of Charge in Quantum Well in the Field Structure], *Transactions of Tambov State Technical University*, 2011, vol. 17, no. 2, pp. 525-528. (In Russ., abstract in Eng.)

## **Untersuchung der elektrophysikalischen Eigenschaften des Verbundwerkstoffs Eisen-Wolframkarbid**

**Zusammenfassung:** In der vorliegenden Arbeit werden die elektrophysikalischen Eigenschaften des Verbundwerkstoffs Eisen-Wolframkarbid untersucht. Seine elektrophysikalischen Eigenschaften werden durch den Wert der spezifischen Leitfähigkeit bestimmt, die sich mit wechselnden äußeren Faktoren ändern kann. Der Artikel stellt die Ergebnisse der Untersuchung der Temperaturabhängigkeit des spezifischen Widerstands dieser Komposite dar. Es wird die theoretische Analyse der elektrophysikalischen Prozesse im Material bei der Temperaturänderung durchgeführt. Es ist die Technologie der Herstellung des Verbundwerkstoffs Eisen-Wolframkarbid vorgeschlagen.

---

## **Etude des propriétés électrophysiques de composite fer - carbure de tungstène**

**Résumé:** Dans le présent article sont examinées les propriétés électrophysiques d'un matériau composite fer – carbure de tungstène. Ses propriétés électrophysiques sont définies par la valeur de la conductivité spécifique qui peut varier en fonction des facteurs externes. L'article présente les résultats d'une étude de la dépendance thermique du composite indiqué; est effectuée une analyse théorique des processus électrophysiques dans le matériau lors de la modification de la température. Est proposée la technologie de l'obtention d'un matériau composite fer – carbure de tungstène.

---

**Авторы:** *Королев Андрей Павлович* – кандидат технических наук, доцент кафедры «Материалы и технология»; *Лоскутова Анна Давидовна* – магистрант, ФГБОУ ВО «ТГТУ», г. Тамбов, Россия.

**Рецензент:** *Родионов Юрий Викторович* – доктор технических наук, доцент, заведующий кафедрой «Техническая механика и детали машин», ФГБОУ ВО «ТГТУ», г. Тамбов, Россия.

---