Uzbek Journal of Physics
DOI: https//doi.org/10.52304/.v25i2.419

Омический контакт для *n*-4H-SiC

Х.Н. Жураев[1,2,3], М.У. Хажиев[1], А.Б. Давлатов[1,4], Б.Т. Абдулазизов[*1,4], Б.Г. Атабаев[5]

[1]Физико-технический институт АН РУз, ул. Ч. Айтматова 2Б, 100084,Ташкент, Узбекистан
[2]Национальный исследовательский университет, Ташкентский институт инженеров ирригации и механизации сельского хозяйства ул. Кори Ниязова, 39, 100084,Ташкент, Узбекистан
[3]Ташкентский государственный технический университет имени Ислама Каримова, ул. Университетская 2, Ташкент 100095, Узбекистан
[4]Наманганский государственный университет, ул. Уйчинская 316, 716019, Наманган, Узбекистан
[5]Институт ионно-плазменных и лазерных технологий имени У.А. Арифова АН РУз, ул. Дўрмон йўли, 33, 100125, Ташкент, Узбекистан

Получена 10.10.2022, revised 18.06.2023

* Corresponding author: e-mail : bt_abdulazizov@mail.ru, Phone: +998 91 186 06 05

В работе исследован омический контакт для *n*-4H-SiC. Показано, что при термической обработке в вакуумной установке при температуре 700°C в образцах образуется барьер Шоттки, а при температуре 950°C атомы никеля начинают активно диффундировать в глубь кристалла, что приводит к исчезновению резкой границы металл-полупроводник и соответственно к исчезновению барьера Шоттки. Определено удельное сопротивление никелевых омических контактов, полученных для *n*-4H-SiC. Самое низкое удельное сопротивление омического контакта составило порядка 1.76×10^{-5} Ом·см.

Ключевые слова: 4H-SiC, омический контакт, термическая обработка, барьер Шоттки.

In this work, the ohmic contact has been investigated for *n*-4H-SiC. It is shown that a Schottky barrier is formed in the samples during the vacuum heat treatment at 700°C, and at 950°C nickel atoms begin to actively diffuse into the *n*-4H-SiC crystal, which leads to the disappearance of the sharp metal-semiconductor interface and, consequently, to the disappearance of the Schottky barrier. The resistivity of nickel ohmic contacts obtained for *n*-type 4H-SiC is determined. The lowest resistivity of ohmic contact was about 17×10^{-5} Ohm·cm.

Keywords: 4H-SiC, ohmic contact, thermal treatments, Schottky barrier.

I. Введение

Результаты исследований карбида кремния широко применяются в полупроводниковом приборостроении и в электронике. На его основе изготовляются диоды Шоттки, выпрямительные диоды, силовые диоды, биполярные и полевые транзисторы и другие высокочастотные элементы силовой электроники.

Наиболее важными технологическими операциями при изготовлении карбидкремниевых приборов являются процессы формирования *p*-*n*-переходов и низкоомных омических контактов. Основными материалами в качестве металлических контактов для карбида кремния являются никель, титан и алюминий.

В работе [1] изучены алюминиевые омические контакты для *n*-типа 4H-SiC, которые показали, что напыленный алюминий показал себя как хороший омический контакт. Однако термический отжиг приводит к значительному ухудшению контактных свойств, удельное сопротивление контакта было 3.97×10^{-3}, 4.1×10^{-2}, и 0.153 $\Omega\cdot cm^2$ соответственно после напыления и отжига при 200°C и 400°C.

Омические контакты формировали распылением двухслойного Ti(100 нм)/Al(300 нм) на Al-имплантированные области *p*-типа с последующим быстрым отжигом при 950°C в Ar в течение 60 с для *p*-типа SiC, значения удельного контактного сопротивления $(1.45–7.52)\times10^{-4}$ $см^2$ и

$(0.35–3.7)\times10^{-3}$ см^2 были измерены для образца с защитным углеродным покрытием или без соответственно [2].

Исследованию и технологии изготовления омических контактов посвящено множество работ [3-18]. В работе [3] исследовано влияние быстрого термического отжига на физические свойства структур Ni/4H-SiC. Контактное сопротивление данной структуры определяли с помощью следующей эмпирической формулы $R_k = (R_2 l_1 - R_1 l_2) / (2(l_1 - l_2))$, где l_1 – длина малого резистора R_1, l_2 – длина большого резистора R_2 [3].

В работе [4] проведён обзор литературных данных по результатам исследований омических контактов к карбиду кремния. На основе результатов исследований даны рекомендации по оптимальным контактообразующим слоям для *p*- и *n*-типов SiC политипов 4H, 6H, 3C, 15R, 21R. На рис. 1 приведены удельные сопротивления никелевых контактов к *n*-4H-SiC при различных концентрациях легирования полупроводника [4].

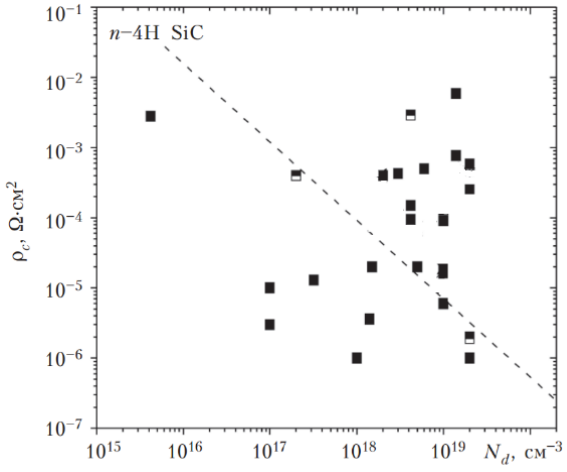


Рисунок 1. Удельные сопротивления никелевых контактов к *n*-4H-SiC при различных концентрациях легирования полупроводника [4].

По результатам исследований омических контактов [4], полученных на 6H- и 4H-SiC, сделан вывод, что никелевый контакт на SiC *n*-типа, имеет самое низкое удельное контактное сопротивление и составляет 8×10^{-6} Вт/см^2.

Также высокотемпературным отжигом получены омические контакты на 4H- и 6H-SiC *n*-типа (0001) [9]. После отжига проводили анализ отдельных контактов с помощью спектроскопии комбинационного рассеяния и измерения электрических свойств. После травления контактных структур проводили наблюдение с помощью атомно-силовой микроскопии. Практически все контактные структуры обладали хорошими омическими свойствами после отжига при 950°C.

Чтобы изготовить новые полупроводниковые устройства, важно получить омический контакт с низким сопротивлением. Ni широко используется в качестве омического контакта для SiC *n*-типа. Согласно работе [7], высокотемпературный отжиг в диапазоне 900–1000°C требуется для формирования омического контакта с низким значением контактного сопротивления, который происходит следующим образом: SiC+Ni-отжиг-силицид ($NiSi_x$)+графит (C).

В работе [13] при 1000ºC получены никелевые омические контакты к сильно легированным образцам *n*-4H-SiC (N_D=10^{16} cm^{-3}). Легирование проводили методом ионной имплантации Al и P, получены *p*-слои (3×10^2 cm^{-3}) и *n*-слои (3×10^{20} cm^{-3}) соответственно. Отжиг полученных контактов проводили в атмосфере N_2 при температурах 200, 300 и 400°C. Удельное сопротивление Ni_2Si контакта для *n*-4H-SiC составляет $\rho_c=1\times10^{-4}$ Ω·cm^2 и для *p*-4H-SiC $\rho_c=1\times10^{-3}$ Ωcm^2 [13].

В табл. 1 приведены результаты обзорной работы итальянских ученых F. La Via и Fabrizio Roccaforte [19] где рассмотрены наиболее значимые результаты в области омических контактов к SiC за последние десять лет. Показано, что образование омических контактов с низким сопротивлением в SiC *n*-типа достигается с помощью контактов Ni_2Si, образующихся при отжиге пленок Ni при температуре выше 950°C. Контакты могут быть получены после процесса отжига при температуре около 1000°C. Однако при этих температурах существует риск окисления верхнего контактного слоя. По этой причине авторами предложены альтернативные решения для уменьшения теплового баланса, необходимого для получения омического поведения металлических слоев до SiC *p*-типа (например, Al/Ni/SiC).

Получение низкоомных омических контактов в неинертных средах методом низкотемпературной диффузии является актуальной задачей. Целью данного раздела является определение удельного сопротивления никелевых омических контактов к кристаллам 4H-SiC.

©Академия наук Республики Узбекистан, 2023 г.

Таблица 1. Омический контакты для *n*-типа SiC.

Metal	Anneling	N_D (at/cm^3)	ρ_C ($\Omega\cdot$cm^2)	Polytype
Ni	none	$>10^{20}$ p-impl	3×10^{-6} (TLM)	4H
Ni	1000°C, 30 s in forming gas	$1\text{-}3\times10^{19}$ epi	$<1.7\times10^{-5}$ (Cox and Strack)	3C/6H
Ni	1000°C, 1 min	4.2×10^{15} epi	2.8×10^{-3} (c-TLM)	4H
Ni	1000°C, 2 min in Ar	$>10^{20}$ P-impl	1.2×10^{-6} (TLM)	4H
Ni	950°C, 10 min	1×10^{19}epi	2.8×10^{-6} (TLM)	4H
Ni	1000°C, 2 min in Ar	2×10^{20} P-impl.	6×10^{-6} (TLM)	4H
Ni	950°C, 2 min in vacuum	$7\text{-}9\times10^{18}$ epi	$<5\times10^{-6}$ (TLM)	6H
Ni	none	5×10^{19} epi	1×10^{-4} (Cox and Strack)	6H (000-1)C face
Ni	1000°C, 5 min in Ar	4.5×10^{20} epi	1×10^{-6}	6H (000-1)C face
Ni	950°C, 10 min in Ar	1.8×10^{18} epi	$\sim1\times10^{-5}$ (TLM)	6H
Ni	950°C, 60 s in N_2	7.4×10^{18} epi	3.9×10^{-5} (TLM)	6H
Ni	1100°C, 3 min in vacuum	1.3×10^{19} epi	1.2×10^{-5} (TLM)	4H
Ni/Cr	1100°C, 3 min in vacuum	3.2×10^{17} epi	2.5×10^{-6} (TLM)	6H
Ni/Si	950°C, 10 min in Ar	1×10^{19} epi	2.7×10^{-5} (TLM)	4H
Ni/Si	900°C, 10 min in Ar-H_2	2×10^{19} epi	1.9×10^{-6} (TLM)	4H
Ni/Si	300°C, 9 hour in N_2	1.5×10^{19} epi	6.9×10^{-4} (TLM)	6H
Ni/Si	950°C, 10 min in Ar	1.8×10^{18} epi	$1\text{-}3\times10^{-4}$ (TLM)	6H

II. Методика эксперимента и образцы

Исходными образцами для исследования были выбраны четыре монокристаллические пластинки 4H-SiC *n*-типа проводимости с различными проводимостями, выращенные сублимационным методом с относительно низкой концентрацией ростовых дефектов (концентрация дислокаций 10^4 см$^{-2}$ и концентрация микротрубок до $10–10^2$ см$^{-2}$). Толщина образцов составляла 400–600 мкм и концентрация примеси донора – $N_d\sim(0.5–1.0)\times10^{17}$ см$^{-3}$. Удельное сопротивление ρ полученных образцов при комнатной температуре составило ~4.5–90 Ом·см

Омические контакты были получены напылением слоя Ni с последующим отжигом при 700°C и 950°C в течение 1 минуты. Площадь контакта составляла 1 мм^2, контакт получен в вакуумной установке ВУП4 при вакууме10^{-6} Торр.

Стационарную вольтамперную характеристику омического контакта измеряли при комнатной температуре по стандартной схеме.

III. Результаты и их обсуждение

Свойства контакта исследовали с помощью измерения вольтамперной характеристики четырех указанных образцов.

На рис. 2 приведены I-V характеристики исходных (без контакта) 4H-SiC пластинок. Как видно из ВАХ, образцы №1 и №2 имеют выпрямительные участки при обратном напряжении. Это свидетельствует о присутствии барьера. Образцы №3 и №4 имеют линейную зависимость напряжения от тока. Здесь, по всей вероятности, барьер отсутствует.

На рис. 3 представлены ВАХ *n*-4H-SiC с никелевыми контактами после отжига при температуре 700ºC в вакуумной установке. Образец №1 имеет линейную зависимость тока от напряжения (см. рис. 3a), это говорит о том, что после отжига барьер исчезает, чего не скажешь об образце №2 (см. рис. 3b). Обратный эффект оказывает отжиг для образцов №3 и №4 (см. рис. 3c,d), Здесь, наоборот, после отжига появляется барьер. Особенно сильно это проявляется на ВАХ образца №4, где выпрямляющее свойство присутствует даже при обратном напряжении –30 В.

©Академия наук Республики Узбекистан, 2023 г.

Такое поведение вольтамперной характеристики можно объяснить появлением барьера Шоттки. Вероятность появления такого барьера велика в контактной области никеля и кристалла *n*-4H-SiC (контакт металл полупроводник).

.

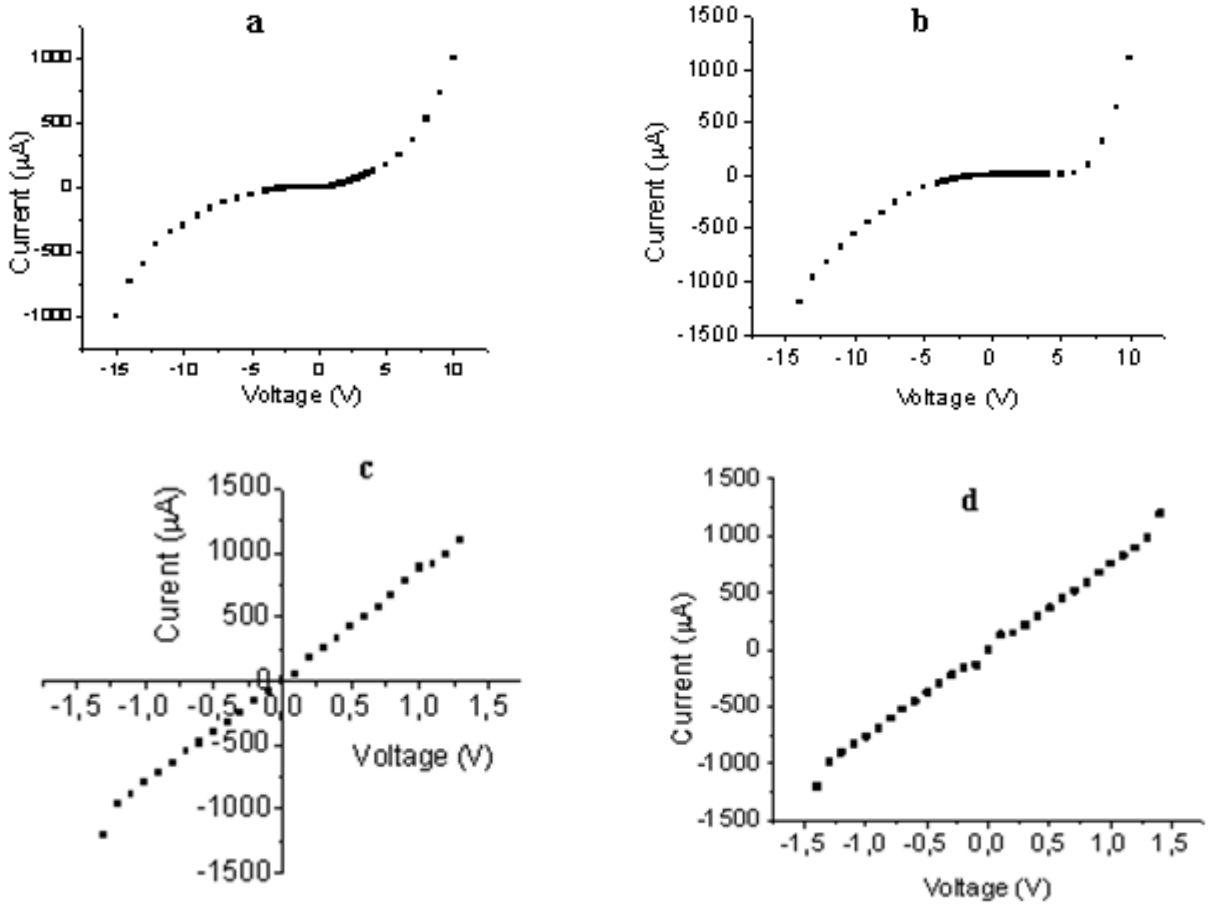


Рисунок 2. Вольтамперные характеристики *n*-4H-SiC пластинки: №1 (**a**), №2 (**b**), №3 (**c**), №4 (**d**).

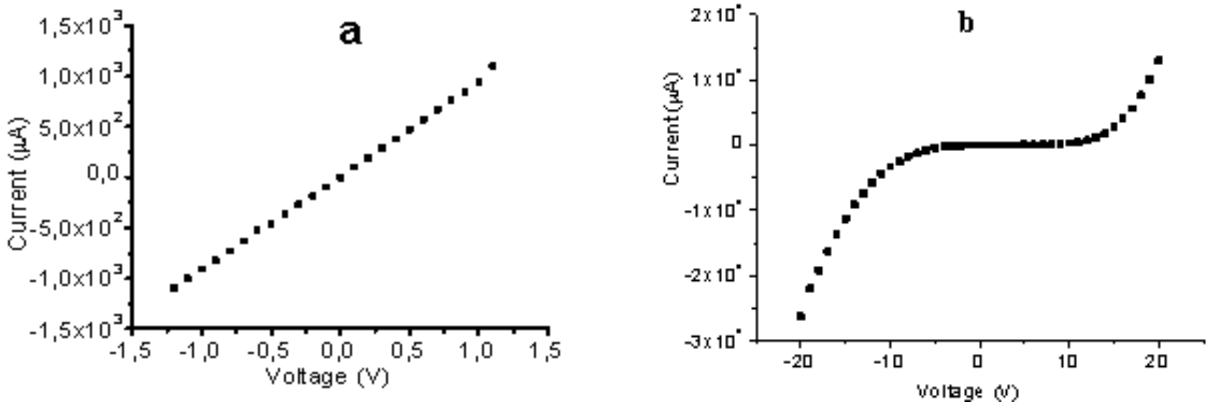


Рисунок 3a, b. Вольтамперные характеристики *n*-4H-SiC с никелевыми контактами после отжига при температуре 700ºC в вакуумной установке: **a** – 4H-SiC пластинка №1, **b –** 4H-SiC пластинка №2.

©Академия наук Республики Узбекистан, 2023 г.

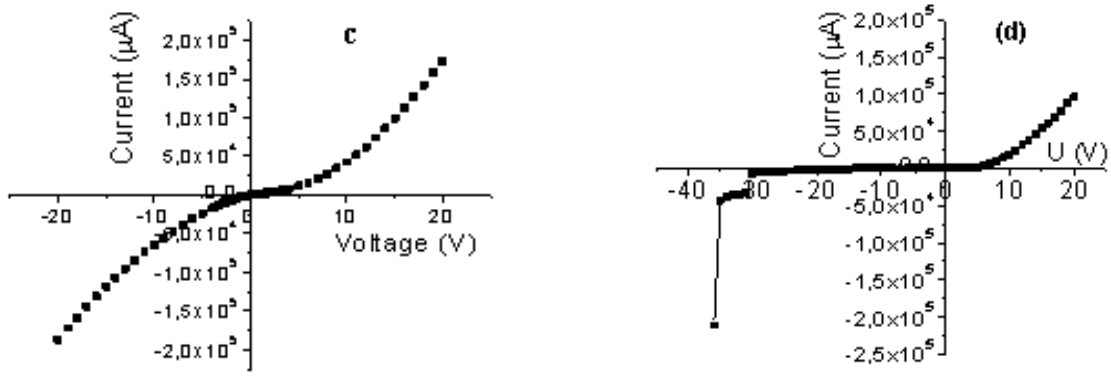


Рисунок 3c, d. Вольтамперные характеристики *n*-4H-SiC с никелевыми контактами после отжига при температуре 700ºС в вакуумной установке: **c** – 4H-SiC пластинка №3, **d** – 4H-SiC пластинка №4.

Далее были измерены вольтамперные характеристики образцов *n*-4H-SiC с никелевыми контактами, полученные после отжига в вакуумной установке при температуре 950ºС течение 1 минуты.

Анализ ВАХ показывает, что практически во всех образцах зависимость тока от напряжения имели линейный характер, то есть барьер исчез (см. рис.4). Это говорит о том, что при данной температуре атомы никеля начинают активно диффундировать в глубь кристалла n-4*H*-SiC, что приводит к исчезновению резкой границе металл-полупроводник и соответственно барьера Шотткки.

.

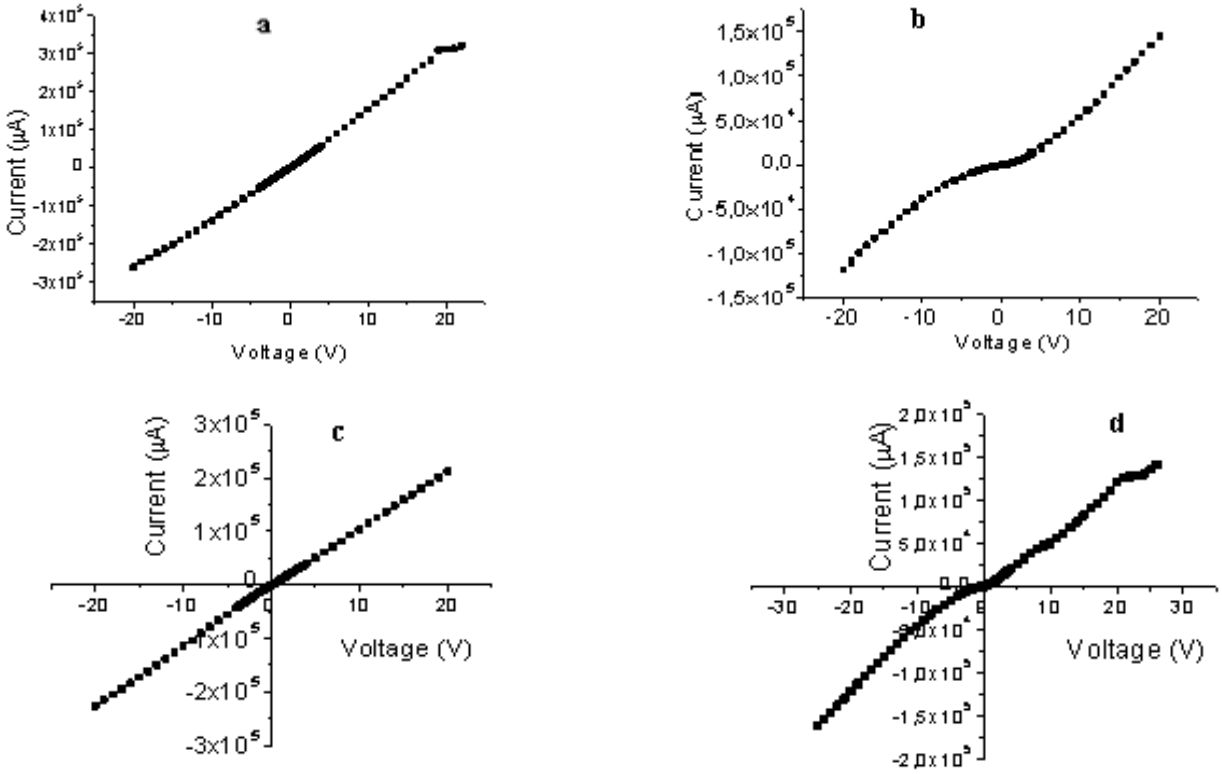


Рисунок 4. Вольтамперные характеристики *n*-4H-SiC с никелевыми контактами, полученные после отжига в вакуумной установке при температуре 950ºС в течение 1 минуты: **a –** 4H-SiC пластинка №1, **b** – 4H-SiC пластинка №2, **c** – 4H-SiC пластинка №3, **d** – 4H-SiC пластинка №4.

©Академия наук Республики Узбекистан, 2023 г.

На основе полученных данных определено удельное сопротивление омических контактов. В работе [20] предложен метод определения удельного сопротивления омических контактов к полупроводниковым пластинам следующим выражением:

$$\rho_k = \frac{\pi d_k^2 (R - R_s)}{8}.$$

Здесь R – общее сопротивление образца с контактами, R_s – сопротивление образца, d_k – диаметр контакта.

Пользуясь этим выражением, определяем удельное сопротивление омических контактов наших образцов. Ниже в табл. 2 приведены результаты значений омических контактов. Как видно, после отжига при температуре 950°C значение удельного сопротивления омических контактов становится на порядок меньше, чем при отжиге с температурой 700°C.

Таблица 2. Удельное сопротивление никелевых контактов для четырех образцов при разных температурах отжига.

Температура отжига	Удельное сопротивление никелевых контактов			
	Образец №1	Образец №2	Образец №3	Образец №4
700°C	3.10E-04	1.70E-04	4.10E-05	БШ
950°C	5.70E-05	1.76E-05	2.60E-05	5.37E-05

На основе результатов, приведенных на табл. 2, построен график зависимости удельного сопротивления омических контактов от температуры.

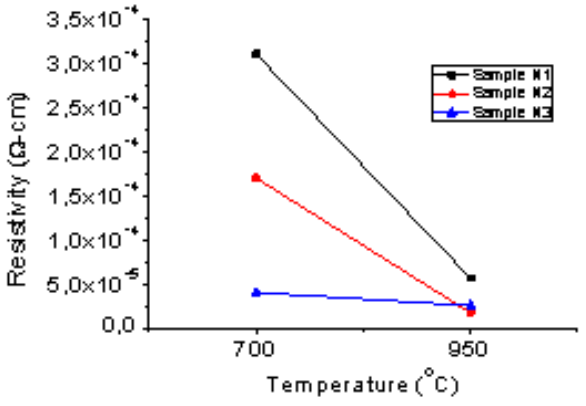


Рисунок 5. Зависимость удельного сопротивления омических контактов от температуры термообработки.

Как видно из рис. 5 и табл. 2 самое низкое удельное сопротивление получено у образца №2.

IV. Заключение

Показано, что при термической обработке в вакуумной установке при температуре 700ºC в образцах образуется барьер Шоттки, а при температуре 950°C атомы никеля начинают активно диффундировать в глубь кристалла *n*-4H-SiC, что приводит к исчезновению резкой границы металл-полупроводник и соответственно барьера Шоттки.

Определено удельное сопротивление никелевых омических контактов, полученных для 4H-SiC *n*-типа. Самое низкое удельное сопротивление омического контакта составило порядка 1.76×10^{-5} Ом·см.

Благодарности. Работа выполнена при финансовой поддержке Программы фундаментальных исследований АН РУз по теме «Фотоэлектрические, термовольтаические, фототермовольтаические и радиационные эффекты в двух- и многокомпонентных полупроводниковых твердых растворах с нанокристаллами, полученными на кремниевых подложках из жидкой фазы».

Метаданные

Ohmic contact for *n*-4H-SiC

Kh.N. Juraev[1,2,3], M.U. Khazhiev[1], A.B. Davlatov[1,4], B.T. Abdulazizov[1,4], B.G. Atabaev[5]

[1]Physical-Technical Institute, Uzbekistan AS, Chingiz Aytmatov 2B, Tashkent, 100084, Uzbekistan
[2]Tashkent Institute of Irrigation and Agricultural Mechanization Engineers,-National Research University, 100084, Kori Niyoziy str., 39, Tashkent, Uzbekistan
[3]Tashkent State Technical University, University street 2, Tashkent 100095, Uzbekistan
[4]Namangan State University, Uychi str. 316, 716019 Namangan, Uzbekistan
[5]Arifov Institute of Ion-Plasma and Laser Technologies of Uzbekistan AS, 100125, Durmon yuli st. 33, Tashkent, Uzbekistan

In this work, the ohmic contact has been investigated for *n*-4H-SiC. It is shown that a Schottky barrier is formed in the samples during the vacuum heat treatment at 700°C, and at 950°C nickel atoms begin to actively diffuse into the *n*-4H-SiC crystal, which leads to the disappearance of the sharp metal-semiconductor interface and, consequently, to the

©Академия наук Республики Узбекистан, 2023 г.

disappearance of the Schottky barrier. The resistivity of nickel ohmic contacts obtained for *n*-type 4H-SiC is determined. The lowest resistivity of ohmic contact was about 17×10^{-5} Ohm·cm.

Keywords: 4H-SiC, ohmic contact, thermal treatments, Schottky barrier.

Литература (References)

[1] S. Kim, H-K. Kim, S. Jeong, M-J. Kang, M-S. Kang, N-S. Lee, T.V. Cuong, S-M. Koo, H. Kim, H-K. Shin. Materials Letters **228**, 232–234 (2018).
[2] A. Frazzetto, F. Giannazzo, R. L. Nigro, V. Raineri and F. Roccaforte, J. Phys. D: Appl. Phys. **44**, 255302(2011).
[3] Y.A. Yurakov, M.I. Chernykh, A.N. Tsotsorin, V.A. Kozhevnikov, S.V. Kannykin, E.N. Bormontov, & N.A. Rumyantseva. Condensed Matter and Interphases, **17**(3), 384-391 (2015).
[4] Ya.Ya. Kudryuk, R.I. Bigun,R.Ya. Kudryuk. Technology and Design in Electronic Equipment **1**, 25-36 (2013).
[5] P.G. Neudeck. Silicon Carbide Technology. In book: The VI.SI Handbookю. Ed. by Wal-Kal Chen. CRC Press I. I.C. (2006).
[6] Lee Sang-Kwon. Processing and Characterization of Silicon Carbide (6H- and 4H-SiC) Contact for High Power and High Temperature Device Applications. Ph.D. Dissertation.- (Stockholm, KTH, Royal Institute of Technology, 2002).
[7] B.J. Baliga. Fundamentals of Power Semiconductor Devices (NY, Springer Science+Business Media, 2008).
[8] Stanislav Cichoň, Petr Machбč, Bohumil Barda, Vladimir Machovič, Petr Slepička. Thin Solid Films **520**, 4378 (2012).
[9] A.V. Kuchuk, M. Guziewich, R. Ratajaczak, M. Wzorek, V.P. Kladko, A. Piotrowska. Microelectron. Eng. **85**, 2142 (2008).
[10] J. Crofton, S.E. Mohney, J.R. Williams, T. Isaacs-Smithd. Solid-State Electronics **46**, 109 (2002).
[11] W. Lu, W.C. Mithel, G.R. Landis, T.R Crenshaw, W. Eugene Collins. Solid-State Electron. **47**, 2001 (2005).
[12] M.R. Jennings, A. Pe´rez-Toma´s, M. Davies, D. Walker, L. Zhu, P. Losee, W. Huang, S. Balachandran, O.J. Guy, J.A. Covington, T.P. Chow, P.A. Mawby. Solid-State Electron. **51**, 797-801 (2007).
[13] M. Vivona, G. Greco, S. Di Franco, F. Giannazzo, F. Roccaforte, A. Frazzetto, S. Rascunà, E. Zanetti, A. Guarnera, M. Saggio. Materials Science Forum **778-780**, 665-668 (2014).
[14] T.V. Blank, Y.A. Goldberg, E.A. Posse, F.Yu. Soldatenkov. Semiconductors **44**,463 (2010).
[15] S. Tanimoto, M. Inada, N. Kiritani, M. Hoshi, H. Okushi, K. Arai. Mat. Sci. Forum **457-460**, 1221-1224 (2004).
[16] H. Na, H. Kim, K. Adachi, N. Kiritani, S. Tanimoto, H. Okushi, K. Arai. J. Electron. Mater. **33**, 89-93 (2004).
[17] S. Kim, H.-K. Kim, M. Lim, S. Jeong, M.-J. Kang, M.-S. Kang, N.-S. Lee, T. V. Cuong, H. Kim, T. Erlbacher, A. Bauer, and H.-K. Shin. Journal of Nanomaterials **2019**, 5231983 (2019).
[18] A.V. Kuchuk, P. Borowicz, M. Wzorek, M. Borysiewicz, R. Ratajczak, K. Golaszewska, E. Kaminska, V. Kladko, and A. Piotrowska. Adv. Cond. Matt. Phys. **2016**, 273702 (2016).
[19] F. La Via, Fabrizio Roccaforte. Raineri.International Journal of High Speed Electronics and Systems **15**(04), 77-116 (2006).
[20] R.H. Cox, H. Strack. Solid-State Electronics **10**, 1213 (1967).

n-4H-SiC учун омик контакт

Х.Н. Жураев[1,2,3], М.У. Хажиев[1], А.Б. Давлатов[1,4], Б.Т. Абдулазизов[1,4], Б.Г. Атабаев[5]

[1]Ўзбекистон Фанлар Академияси Физика-техника институти, Чингиз Айтматов кўч., 2Б, 100084, Тошкент, Ўзбекистон
[2]Наманган давлат университети, Уйчи кўча 316, 716019, Наманган, Ўзбекистон
[3]ЎзРФА Ион-плазма ва лазер технологиялари институти, Дурмон йули 33, 100125, Тошкент, Ўзбекистон

[1]Ўзбекистон Фанлар Академияси Физика-техника институти, Чингиз Айтматов кўч., 2Б, 100084, Тошкент, Ўзбекистон
[2]Тошкент ирригация ва қишлоқ хўжалигини механизациялаш мухандислари институти“ Миллий тадқиқот университети, Кори Ниёзий 39, 100084, Тошкент, Ўзбекистон
[3]Ислом Каримов номидаги Тошкент Давлат Техника Университети, Университет 2, Ташкент 100095, Узбекистан
[4]Наманган давлат университети, Уйчи 316, 716019, Наманган, Ўзбекистон
[5]ЎзРФА Ион-плазма ва лазер технологиялари институти, Дурмон йули 33, 100125, Тошкент, Ўзбекистон

Ушбу мақолада кремния карбидининг *n*-4H-SiC намуналари учун омик контакт тадқиқ қилинди. Вакуумда 700°C да намунага термик ишлов берилганда намуналарда Шоттки баръери ҳосил булиши кузатилди ва 950 ºC да термик ишлов беришда эса никель атомлари n-4H-SiC кристали ичига томон фаол тарқала бошлаши, бу эса метал-яримўтказгич чегарасининг йўқолишига ва шунга мос равишда Шоттки баръерининг йўқолишига олиб олиб келди.
n-типли 4H-SiC намуналари учун олинган никель омик контактларининг солиштирма қаршилиги ўлчанди. Омик контактларининг энг кичик солиштирма қаришлиги тахминан $17\cdot10^{-6}$ Ом·см га тенг бўлиши аниқланди.

Калит сўзлар:4H-SiC, омик контакт, термик ишлов бериш, Шотки барьер.

©Академия наук Республики Узбекистан, 2023 г.