

О формировании низкоомных контактов для биполярных приборов на основе 4H-SiC

© А.В. Афанасьев, В.А. Ильин, В.В. Лучинин, А.В. Серков, Д.А. Чигирев

Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет „ЛЭТИ“,
197022 Санкт-Петербург, Россия

E-mail: a_afanasjev@mail.ru

Поступила в Редакцию 1 марта 2022 г.

В окончательной редакции 25 марта 2022 г.

Принята к публикации 25 марта 2022 г.

Представлены результаты исследований по отработке технологических приемов формирования низкоомных контактных систем к *n*- и *p*-SiC на основе монослойных и многослойных Ni-, Al- и Ti-композиций для биполярных 4H-SiC приборов. Показано, что формирование низкоомных контактов на основе Ni к *n*-4H-SiC ($\rho_c = 3.6 \cdot 10^{-4}$ Ом·см²) и Ni/Al к *p*-4H-SiC ($\rho_c = 5.9 \cdot 10^{-5}$ Ом·см²) возможно в одном цикле вакуумного отжига при 1000°C длительностью 120 с. Данное технологическое решение позволяет уменьшить количество высокотемпературных процессов.

Ключевые слова: 4H-SiC, *n*-тип, *p*-тип, омические контакты, быстрый термический отжиг (RTA), Transmission Line Method, удельное контактное сопротивление.

DOI: 10.21883/FTP.2022.06.52598.9827

1. Введение

Одной из важных задач в технологии SiC-приборов (4H-SiC) различного назначения является создание низкоомных линейных и термостабильных контактов к областям с различными типами проводимости [1]. Несмотря на то что к настоящему времени данный вопрос тщательно исследован и полученные результаты позволяют создавать воспроизводимые и надежные контактные системы металла с 4H-SiC в коммерческих приборах типа JBS и MOSFET, работы в этом направлении продолжают и являются предметом дискуссий [1,2]. Обращают на себя внимание некоторые расхождения опубликованных экспериментальных результатов в части минимизации удельного контактного сопротивления (ρ_c) при использовании одинаковых металлов и их композиций, а также в части близких режимов формирования омических контактов. Данное обстоятельство указывает на то, что технологические режимы формирования омических контактов уникальны и обусловлены совокупностью особенностей технологического маршрута: способом подготовки поверхности, методом нанесения металлов, режимами и условиями термообработки. Кроме того, важным фактором, определяющим значение ρ_c , является область формирования омического контакта: сильно легированная подложка, эпитаксиальные или ионно-имплантированные слои. Тем не менее общим для изготовления линейных контактов ко всем указанным типам SiC-областей является нанесение металлизации с последующим быстрым высокотемпературным отжигом (RTA: резистивным, высокочастотным, радиационным или лазерным) при температурах 900–1100°C в вакууме или в инертной среде [3–5].

Для 4H-SiC в качестве контактного материала используются различные металлы, комбинации металлов, сплавы и силицидные соединения. Наиболее популярным металлом является Ni, который при термообработке > 900°C в результате протекания твердофазных реакций образует силицид никеля (Ni₂Si), что дает низкоомный линейный контакт к *n*-SiC [3,5], а также линейный контакт к сильно легированному ионно-имплантированному слою *p*-SiC с ρ_c , как правило, на 1–2 порядка выше, чем к *n*-SiC [6]. Применение данного металла представляет интерес при создании в окнах SiO₂ самосовмещенного контакта типа Ni-SALICIDE (self-aligned silicide) [7,8], например, при одновременном формировании омических контактов к *n*⁺- и *p*⁺-областям истока MOSFET.

Для формирования низкоомных контактов к *p*-SiC помимо никеля обычно используются композиции на основе Al/Ti [3], Al/Ti/Ni [9], Al/Ni [8] и др. Следует отметить, что титан и никель в данных многослойных композициях применяются в качестве верхних покровных слоев, препятствующих формированию развитого микрорельефа [9].

В работе представлены результаты исследований по отработке технологических приемов формирования низкоомных контактных систем к *n*- и *p*-SiC на основе монослойных и многослойных Ni-, Al- и Ti-композиций для биполярных 4H-SiC приборов импульсной силовой электроники [10] и УФ-фотоприемных диодов [11].

2. Методика эксперимента

Для создания омических контактов в работе использованы следующие металлы и композиции: для контакта к *n*-4H-SiC — Ni, для контакта к *p*-4H-SiC — Ni,

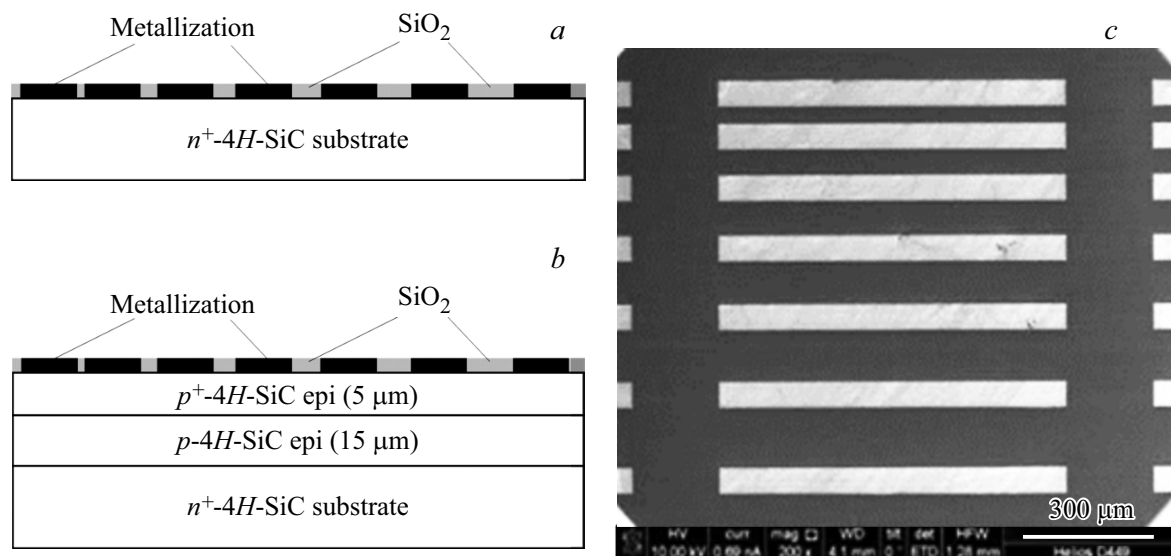


Рис. 1. Схематические изображения тестовых структур для исследования контактных сопротивлений к n - $4H$ -SiC (a), p - $4H$ -SiC (b) и фотография их TLM-топологии (c).

Al/Ni, Al/Ti/Ni. Формирование контактов к n -SiC проводилось на n - $4H$ -SiC подложках двусторонней полировки с удельным сопротивлением $0.02\text{--}0.03\ \text{Ом}\cdot\text{см}$ (рис. 1, a). Исследование свойств контактов к p -SiC слоям проводилось на многослойных эпитруктурах, предназначенных для изготовления высоковольтных p - n -диодов с дрейфовой p -областью [10]. Омические контакты формировались к верхнему p^+ -эпислою (рис. 1, b). Для измерения ВАХ и расчета ρ_c был выбран линейный TLM-метод (Transmission Line Method) как наиболее простой в реализации и оптимальный для исследуемых объектов, представляющих собой структуру „металл-однородно легированный полупроводник“ [12].

Контакты для TLM-измерений изготавливались в следующей последовательности: RCA-очистка поверхности SiC, нанесение слоя SiO₂ толщиной 200 нм, фотолитография и вскрытие окон в слое SiO₂, нанесение металлов и формирование TLM-топологии взрывным (lift-off) методом (рис. 1, c). Для исследования влияния температуры отжига на ρ_c пластины были разрезаны на образцы малой площади так, чтобы количество TLM-элементов составляло не менее 10 на образец.

Высокотемпературный отжиг образцов Ni/ n -SiC, Ni/ p -SiC, Ni/Al/ p -SiC, Ni/Al/Ti/ p -SiC проводился в вакууме при температурах 800, 850–1100°C в течение 120 с.

3. Экспериментальные результаты

В соответствии с методикой определения удельного контактного сопротивления TLM-методом [12] были измерены ВАХ полученных образцов. В качестве примера на рис. 2 приведены ВАХ неотожженных образцов Ni/ n -SiC, Ni/ p -SiC, Ni/Al/ p -SiC, Ni/Al/Ti/ p -SiC. Видно, что

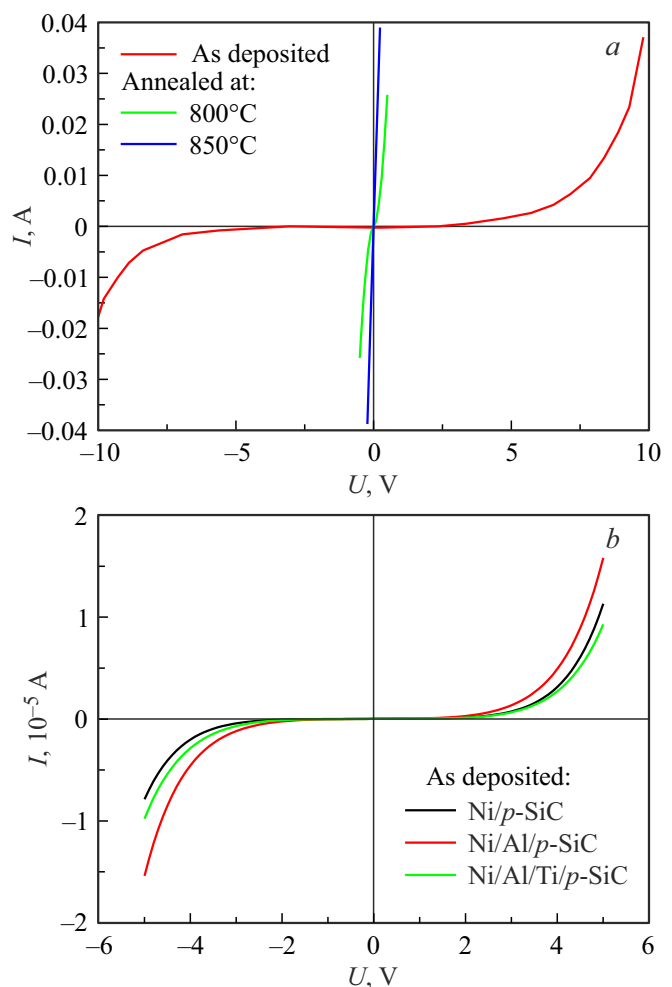


Рис. 2. ВАХ контактных систем: Ni/ n -SiC (a) и Ni/ p -SiC, Ni/Al/ p -SiC, Ni/Al/Ti/ p -SiC (b).

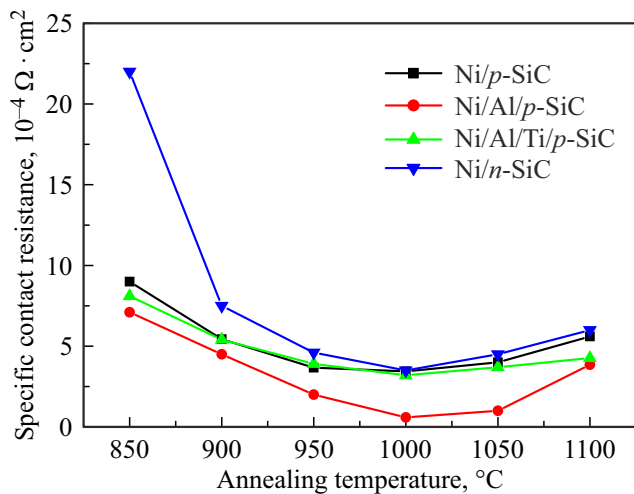


Рис. 3. Зависимости удельного контактного сопротивления для: Ni/n-SiC, Ni/p-SiC, Ni/Al/p-SiC, Ni/Al/Ti/p-SiC от температуры отжига.

характеристики нелинейны и практически симметричны относительно центра координат. По своему виду они соответствуют ВАХ встречновключенных диодов с барьером Шоттки, выполненных на сильно легированной подложке или эпитаксиальном слое. Нелинейность ВАХ наблюдается на отожженных при 800°C образцах (рис. 2, а). Начиная с температуры отжига 850°C и выше, ВАХ образцов становятся линейными (омическими), что дает возможность корректного определения удельного контактного сопротивления TLM-методом.

Расчет удельного контактного сопротивления по линейному TLM-методу показал, что для образцов Ni/n-SiC, Ni/p-SiC, Ni/Al/p-SiC, Ni/Al/Ti/p-SiC минимальные значения ρ_c достигаются при температуре отжига 1000°C (рис. 3), которая, вероятно, является оптимальной для формирования низкоомных омических контактов. Из рис. 3 видно, что минимальное удельное контактное сопротивление для Ni/n-SiC составило $3.6 \cdot 10^{-4}$ Ом·см². Такое значение является стандартным для омических контактов к n-SiC [1–4]. Среди исследованных контактных систем к p-SiC образцы Ni (200 нм)/Al (50 нм)/p-SiC имели наименьшее $\rho_c = 5.9 \cdot 10^{-5}$ Ом·см². Это значение в несколько раз ниже удельного контактного сопротивления по сравнению с широко используемой в технологии SiC-приборов композицией на основе Ni и Ni/Al/Ti [8]. Как было отмечено ранее, данный результат отражает индивидуальные особенности технологических операций при формировании контактных систем.

4. Заключение

Контактные системы, исследованные в настоящей работе, показали низкое значение ρ_c к n-SiC и p-SiC, что

позволяет применять их при создании приборных структур. Показано, что формирование низкоомных контактов на основе Ni n-4H-SiC и Ni/Al к p-4H-SiC возможно в едином технологическом цикле вакуумного отжига при температуре 1000°C длительностью 120 с. Данное технологическое решение позволяет уменьшить количество высокотемпературных процессов при изготовлении биполярных приборов на основе 4H-SiC.

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Список литературы

- [1] T. Kimoto, J.A. Cooper. *Fundamentals of silicon carbide technology: growth, characterization, devices and applications* (Singapore, John Wiley & Sons, Inc., 2014).
- [2] F. Roccaforte, M. Vivona, G. Greco, R. Lo Nigro, F. Giannazzo, S. Rascunà, M. Saggio. *Mater. Sci. Forum*, **924**, 339 (2018).
- [3] М.Г. Растегаева. Автореф. канд. дис. (СПб., ФТИ им. А.Ф. Иоффе, 1999) с. 16.
- [4] А.В. Афанасьев. Автореф. канд. дис. (СПб., СПбГЭТУ „ЛЭТИ“, 1999) с. 16.
- [5] I.P. Nikitina, K.V. Vassilevski, N.G. Wright, A.B. Horsfall, A.G. O'Neill, C.M. Johnson. *J. Appl. Phys.*, **97**, 083709 (2005).
- [6] M. Vivona, G. Greco, F. Giannazzo, R. Lo Nigro, S. Rascunà, M. Saggio, F. Roccaforte. *Semicond. Sci. Technol.*, **29**, 075018 (2014).
- [7] H. Elahipanah, A. Asadollahi, M. Ekstrom, A. Salemi, C. Zetterling, M. Ostling. *ECS J. Solid State Sci. Technol.*, **6** (4), 197 (2017).
- [8] T. Śledziwski, T. Erlbacher, A. Bauer, L. Frey, X. Chen, Y. Zhao, C. Li, X. Dai. *Mater. Sci. Forum*, **963**, 490 (2019).
- [9] M. Vivona, G. Greco, C. Bongiorno, S. Di Franco, R. Lo Nigro, S. Scalese, S. Rascunà, M. Saggio, F. Roccaforte. *Mater. Sci. Forum*, **924**, 377 (2018).
- [10] A.V. Afanasyev, Yu.A. Demin, B.V. Ivanov, V.A. Ilyin, A.F. Kardo-Sysoev, V.V. Luchinin, S.A. Reshanov, A. Schöner, K.A. Sergushichev, A.A. Smirnov. *Mater. Sci. Forum*, **924**, 841 (2018).
- [11] А.В. Афанасьев, В.А. Ильин, С.А. Решанов, А.А. Романов, К.А. Сергушичев, А.В. Серков, Д.А. Чигирев. *Нано- и микросистемная техника*, **18** (5), 331 (2016).
- [12] G.K. Reeves, H.B. Harrison. *IEEE Electron Dev. Lett.*, **3** (5), 111 (1982).

Редактор Г.А. Оганесян

On the Formation of Low-Resistivity Contacts for 4H-SiC Bipolar Devices

A.V. Afanasev, V.A. Ilyin, V.V. Luchinin,
A.V. Serkov, D.A. Chigirev

St. Petersburg Electrotechnical University,
197022 St. Petersburg, Russia

Abstract The results of studies on the development of technological methods for the formation of low-resistivity contact systems to *n*- and *p*-SiC based on single and multilayer Ni-, Al- and Ti-compositions for 4H-SiC based bipolar devices are presented. It is shown that the formation of low-resistivity contacts based on Ni to *n*-4H-SiC ($\rho_c = 3.6 \cdot 10^{-4} \Omega \cdot \text{cm}^2$) and Ni/Al to *p*-4H-SiC ($\rho_c = 5.9 \cdot 10^{-5} \Omega \cdot \text{cm}^2$) is possible within a single cycle of vacuum annealing at 1000°C for 120 s. This technological solution makes it possible to reduce the number of high-temperature processes.