

УДК 621.328.2

К. т. н. Я. Я. КУДРИК¹, Р. И. БИГУН², Р. Я. КУДРИК²Украина, г. Киев, ¹Институт физики полупроводников им. В. Е. Лашкарёва НАНУ;²Львовский национальный университет им. И. Я. Франко

E-mail: Bh_@mail.ru

ТЕХНОЛОГИЯ ИЗГОТОВЛЕНИЯ КОНТАКТОВ К КАРБИДУ КРЕМНИЯ

Систематизированы имеющиеся в различных публикациях результаты исследований удельного сопротивления омических контактов к карбиду кремния, изготовленных без какой-либо модификации поверхности полупроводника. Проведен анализ группы контактов с наилучшими параметрами, и на основе его результатов даны рекомендации по оптимальным контактообразующим слоям для *p*- и *n*-типов SiC политипов 4H, 6H, 3C, 15R, 21R.

Ключевые слова: омический контакт, SiC.

В последние десятилетия началось бурное развитие широкозонной электроники [1–6], находящей применение в области высоких мощностей (системы контроля двигателя электромобилей, конверторы электроэнергии), высоких напряжений (электроэнергетика), высоких удельных мощностей (миниатюрные системы питания, аэрокосмическая электроника), высоких температур (для датчиков и более экономичного управления сгоранием в двигателях реактивных самолетов и автомобилей), микроволновой (радиолокация и

связь), радиационно стойкой (электроника военного назначения) аппаратуры и оптоэлектроники. Основные параметры полупроводниковых материалов приведены в **табл. 1**.

Для анализа перспективности использования полупроводникового материала в микроэлектронике часто используют специальные критерии качества полупроводника — параметры, характеризующие эффективность применения полупроводника в определенной области микроэлектроники [9]. В **табл. 2** приведены следующие

Таблица 1

Параметры полупроводниковых материалов при 300 К [1, 7, 8]

Параметр	Si	GaAs	3H SiC	4H SiC	6H SiC	GaN	Алмаз
Ширина запрещенной зоны, E_g , эВ	1,12	1,43	2,3	3,26	3,03	3,4	5,5
Критическая напряженность электрического поля, E_c , 10^6 В/см	0,29	0,4	2	2,4	2,5	3,3	10
Подвижность электронов, μ_n , $\text{см}^2/(\text{В}\cdot\text{с})$	1350	8500	1000	880	400	1000	2200
Подвижность дырок, μ_p , $\text{см}^2/(\text{В}\cdot\text{с})$	490	400		80	120	30	1800
Дрейфовая скорость насыщения, v_{sat} , 10^7 см/с	1	2	2,5	2	2	2,5	1,5
Теплопроводность, λ , Вт/(см·К)	1,3	0,55	4	4	4	1,3	7
Диэлектрическая проницаемость, ϵ_s	11,7	12,8	9,72	9,7	9,66	8,9	5,7
Температура Дебая, К	645	360	1200	1300	1200	600	1860

Таблица 2

Основные критерии качества некоторых широкозонных полупроводников, нормированные по кремнию [1, 7, 10]

Критерий	Si	GaAs	3C SiC	4H SiC	6H SiC	GaN	Алмаз
JM	1	8	297	274	297	809	2675
KM	1	0,6	5,3	4,8	4,8	1,8	9,4
BM	1	18	200	306	157	830	33000
$QF1$	1	7,6	620	940	480	830	175000
$QF2$	1	10,5	4280	7800	4160	9400	$6\cdot 10^6$
$BHFM$	1	12	35,2	44,6	22	96	1900

щие критерии качества для ряда широкозонных полупроводников:

JM — критерий качества Джонсона, определяющий рабочий предел производительности прибора (мощность и частота), $JM = (E_c v_{sat} / \pi)^2$;

KM — критерий качества Кейеса, в котором учитывается скорость переключения транзистора при работе в качестве логического элемента микропроцессора, $KM = \lambda(v_{sat} / \epsilon_s)^{1/2}$;

BM — критерий Балига для оценки полупроводникового материала, связанный с потерями при работе мощных полевых транзисторов. Применим для оценки возможностей полупроводника с точки зрения его использования в низкочастотных приборах, $BM = \sigma_A = \epsilon_s \mu E_c^3$;

$QF1$ — критерий качества, учитывающий термические свойства полупроводника, функционирующего в активной зоне мощного прибора (термический KM), $QF1 = \lambda \sigma_A$;

$QF2$ — критерий качества, учитывающий термические свойства полупроводника в предположении, что теплоотвод идеален, $QF2 = \lambda \sigma_A E_c$;

$BHFM$ — критерий Балига для оценки возможностей полупроводника с точки зрения его использования в высокочастотных приборах с учетом потерь, связанных с переключениями, $BHFM = \mu E_c^2$.

Из табл. 1, 2 видно, что к наиболее перспективным полупроводниковым материалам для разработки элементной базы силовой электроники относятся алмаз, карбид кремния и нитрид галлия, которые превосходят кремний и арсенид галлия по всей совокупности физических и химических свойств: тепловой и радиационной стойкости, механической прочности, химической инертности, электрической прочности, предельной скорости дрейфа носителей тока, теплопроводности и т. д.

При разработке и изготовлении приборов на карбиде кремния возникает множество конструктивных и технологических проблем, решение которых позволит реализовать все преимущества карбида кремния на практике. Одной из таких технологических проблем является технология формирования омических контактов как к p^+ - и n^+ -областям, так и к слаболегированному карбиду кремния.

Из около 170 известных политипов SiC только три широко исследуются с целью создания к ним омических контактов — 3C, 4H и 6H (рис. 1). Из представленного на рис. 2 графика видно, что в последние годы резко возросло число

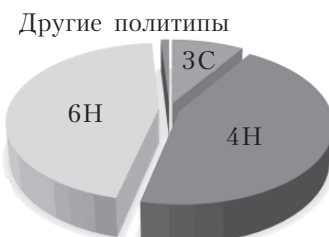


Рис. 1. Соотношение количества опубликованных результатов по омическим контактам к разным политипам карбида кремния (по данным более 100 сообщений)

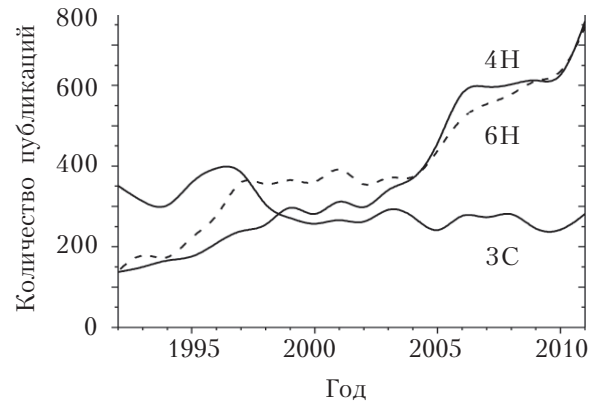


Рис. 2. Динамика количества опубликованных работ по разным политипам карбида кремния (по данным библиотеки www.sciencedirect.com)

публикаций, посвященных политипам 6H и 4H (за последние шесть лет количество публикаций на эту тему увеличилось почти вдвое), и несмотря на несколько лучшие параметры 4H SiC, интерес исследователей практически одинаков к обоим политипам.

Разработке технологии изготовления омических контактов к карбиду кремния посвящено довольно большое количество работ, в них показана возможность использования в качестве материала для контактов целого ряда металлов, сплавов и соединений. Однако даже при использовании одинаковых контактных систем на полупроводниковых пластинах одинакового политипа и легирования экспериментальные результаты, полученные разными авторами, существенно различаются из-за разной технологии изготовления контактов. Поэтому провести обработку и систематизацию всех имеющихся данных с целью определения оптимальных материалов и параметров изготовления контакта для конкретных технологических задач весьма затруднительно. Попытки решить эту проблему производились неоднократно [11–15], однако к сегодняшнему дню появилось много нового фактологического материала, позволяющего по-новому взглянуть на процесс и механизмы формирования омического контакта.

Цель данной работы — выработать рекомендации по выбору оптимальных материалов металлизации и технологии изготовления омического контакта к карбиду кремния как перспективных, так и малоизученных политипов на основе обобщения имеющихся литературных данных.

БАЗОВАЯ ТЕХНОЛОГИЯ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ОМИЧЕСКИХ КОНТАКТОВ К КАРБИДУ КРЕМНИЯ

Рассмотрим основные процессы базовой технологии, такие как подготовка поверхности полупроводниковой пластины, послойное нанесение контакта и его отжиг.

Способы, применяющиеся для очистки подложек SiC и снятия SiO₂ [7, 17]

Смесь (объемное соотношение)	T, °C	Время	Название
H ₂ O:NH ₄ OH:H ₂ O ₂ (5:1:1)	75	5 мин	RCA SC1
H ₂ O:HCl:H ₂ O ₂ (5:1:1)	75	5 мин	RCA SC2
H ₂ SO ₄ :H ₂ O ₂ (2.5:1)	100	5 мин	Seven-up
H ₂ O:HF:CH ₃ CH(OH)CH ₃ (100:3:1)	25	100 с	IMEC
HCl:HN ₃ (3:1)	50	5 мин	Царская водка
HF:H ₂ O(1:10)	25	*	Раствор HF (DHF)
H ₂ SO ₄ :H ₂ O ₂ (4:1)	120	*	Piranha
HF:NH ₄ F (1:7)	25	*	BHF
BHF+NH ₄ OH	25	*	pH-модификат BHF (pH 12)

Примечание: * — нет данных

Подготовка полупроводниковой пластины

Обычно подготовка полупроводниковой пластины состоит в предварительной очистке ее по RCA-методике (фирмы RCA) или по методике Хуанга [16] (те же растворы, но удвоенное время экспозиции) (табл. 3). Методика RCA — стандартный набор технологических операций по очистке полупроводниковых пластин, включающий три этапа: удаление органических загрязнений (SC1), удаление оксидов (SC2) и удаление ионных остатков (SC3).

Травление буферного оксида (buffered oxide etch, BOE) чаще всего производят в смеси BHF (см. табл. 3). Перед снятием буферного оксида возможно нанесение фоторезиста. Следующим этапом очистки служит промывка в деионизированной воде (DI) и сушка в потоке азота, после чего пластина загружается в вакуумную камеру.

В табл. 4 собраны данные по различным методикам подготовки поверхности и нанесения металлизации в процессе изготовления контактов хорошего качества (критерии сформулированы ниже).

Качество подготовки полупроводниковой пластины перед нанесением металлизации может определять параметры сформированного омического контакта, особенно при пониженных температурах термического отжига [42–49].

Нанесение контактной металлизации

В зависимости от назначения контакта и требований к его параметрам он может состоять из одного или нескольких слоев, различающихся функционально:

подлегирующий слой — тонкий слой между полупроводником и контактообразующим слоем, атомы которого диффундируют в процессе отжига и создают в приповерхностном слое полупроводника повышенную концентрацию примеси для стимулирования туннельного механизма токопереноса в контакте и, как следствие, снижения контактного сопротивления;

контактообразующий слой — слой металла, сплава или соединения, формирующий потенциальный барьер с полупроводником;

адгезионный слой — тонкий, обычно металлический, слой между антидиффузионным слоем и контактообразующим либо между контактообразующим и внешним слоями металлизации, служит для повышения взаимной смачиваемости наносимых слоев и для повышения механической прочности контакта, предупреждая расслоение;

антидиффузионный слой — предупреждает взаимную диффузию контактообразующего слоя и внешней металлизации [50];

слой внешней металлизации — служит для создания межсоединений, выводов и пр.

Нанесение металлизации производят послойно магнетронным или электронно-лучевым распылением мишени, реже — термическим испарением (табл. 4).

Отжиг

Завершающим этапом формирования омического контакта служит отжиг при температуре $T_{отж}$, производимый в основном в вакууме, в разреженной инертной или в слегка восстановительной атмосфере.

Преимущественно для формирования контактов используют термическую обработку длительностью от 1 до 15 мин (рис. 3). Время термообработки $\tau_{отж}$ выбирается из компромисса между продолжительностью производственного цикла и разбросом параметров контактов между партиями.

Ниже приведем данные по наиболее удачным омическим контактам к каждому из полупроводников.

ХАРАКТЕРИСТИКИ ОМИЧЕСКИХ КОНТАКТОВ

Основными характеристиками омического контакта являются удельное контактное сопротивление и его температурная зависимость, макси-

Данные по различным методикам изготовления контактов

Метод нанесения (атмосфера)	Давление, Торр	Подготовка поверхности	Источник
RF (Ar)	$5 \cdot 10^{-7}$ b.p.	DHF	[18]
e-beam	$1 \cdot 10^{-6}$ b.p.	КОН, сублимационное травление	[19]
e-beam	$1 \cdot 10^{-8}$ b.p.		[20]
RF (Ar, N ₂)	$4 \cdot 10^{-3}$ tot.		[21]
RF (Ar, N ₂)	$4 \cdot 10^{-3}$ tot.		[22]
		Ацетон, метанол, DI	[23]
DC		RCA, окисление при 1150°C, DHF	[24]
th. evapor.	$1 \cdot 10^{-6}$ b.p.	Ацетон, серная кислота, RCA	[25]
e-beam		RCA, piranha	[26]
e-beam		Seven-up, IMEC, DI, сушка в N ₂	[27]
DC	$5 \cdot 10^{-7}$ b.p.	Seven-up, IMEC, DI, сушка в N ₂	[28]
e-beam	$1 \cdot 10^{-9}$ b.p.	RCA SC1, RCA SC2, DHF	[29]
e-beam		Piranha, DI, RCA	[30]
		Piranha, RCA, BOE	[31]
e-beam		Растворители органики, DI, DHF (2 мин), RCA	[32]
e-beam	$1 \cdot 10^{-6}$ b.p.	Химическая очистка, DHF	[33]
RF		Трихлорэтан, ацетон, метанол, DI, RCA SC1 (10 мин), RCA SC2 (10 мин при 70°C), BOE (2 мин), DI	[34]
e-beam	$2 \cdot 10^{-7}$ b.p.		[35]
e-beam	$5 \cdot 10^{-8}$ b.p.		[36]
RF	$1 \cdot 10^{-7}$ b.p.	RCA SC1 (10 мин.), RCA SC2 (10 мин), BOE, DI	[37]
magnetron	$7 \cdot 10^{-3}$ tot.		[38]
	$3 \cdot 10^{-10}$ b.p.	Seven-up (5 мин при 80°C), IMEC, DI, HF:HNO ₃ (1:1) (1 мин), DI	[39]
DC	$3 \cdot 10^{-7}$ b.p.	Ацетон (5 мин), метанол (5 мин), DHF (10 мин), DI, сушка в N ₂	[40]
e-beam	$2 \cdot 10^{-6}$ b.p.	RCA-подобная обработка	[41]
e-beam	10^{-6} b.p.	RCA, сушка, окисление (60 мин при 1150°C), DHF (1 мин)	[42]
th. evapor.			
		Травление в КОН	[43]

Примечания: b.p. (base pressure) — давление в камере до начала распыления; tot. — общее давление в процессе распыления; RF, DC — магнетронное нанесение контакта с приложением переменного и постоянного напряжения соответственно; magnetron — магнетронное нанесение контакта, если тип магнетронного распыления не указан; e-beam — электронно-лучевое распыление мишени; th. evapor. — нанесение контакта термическим испарением

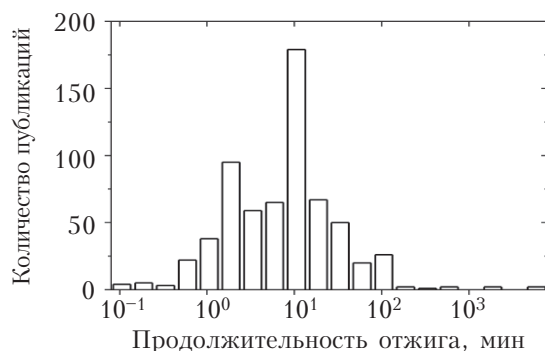


Рис. 3. Гистограмма распределения количества обработанных сообщений о сформированных омических контактах к карбиду кремния по времени термического отжига

мальная рабочая температура, стойкость к радиационным, химическим, механическим и прочим факторам деградации, воздействующим на контакт в процессе его работы. Для определения величины удельного контактного сопротивления используют модификации метода длинной линии (TLM): линейный TLM, TLM с отдельными токовыми контактами, TLM с «плавающим» контактом (FC TLM), радиальный TLM (CTLM) и его модификации — CTLM с коаксиально вложенными контактами (CTLM соax). Также используют четырехточечный метод, метод Кокса — Стрека и другие методы, подробное описание которых (включая фотошаблоны и формулы расчета) приведены [51].

Омические контакты к карбиду кремния n -типа

n -4H SiC

В качестве материалов для контактообразующих слоев (контактообразующий + подлегирующий) омических контактов к n -4H SiC в основном используется никель и его соединения, реже Ti, Al. На рис. 4 собраны данные по удельному сопротивлению для разных контактных металлизаций, полученных различными методами нанесения и термической обработки.

Эмпирически было определено, что зависимость удельного контактного сопротивления оми-

ческих контактов к полупроводникам от степени их легирования имеет обратную корневую зависимость [52], график которой в логарифмических координатах представляет собой прямую с отрицательным коэффициентом наклона. Теоретические модели минимально достижимого предела удельного контактного сопротивления при определенных механизмах токопереноса [52–54] подтверждают такой характер эмпирической зависимости.

В дальнейшем анализе будем рассматривать контакты с сопротивлением ниже эмпирической зависимости (показана пунктиром на рис. 4), называя их контактами хорошего качества, для определения необходимых параметров обработки полупроводниковой пластины, параметров нанесения и видов контактной металлизации.

Как следует из рис. 4, на момент написания обзора лучшие омические контакты в широком диапазоне концентраций легирования полупроводника — это те, что получены на основе Ni, NiCr, NiSi_x или с использованием графитизации поверхности [23, 55] с последующим нанесением Ni. При высоких концентрациях легирования полупроводника хорошие омические контакты получают с контактной металлизацией на основе Ti, AlTi и силицидов кобальта и тантала (табл. 5).

Попытки улучшения омического контакта на основе никеля к 4H SiC идут в нескольких направлениях. Например, если предположить, что основную роль в формировании контакта играют силицидные фазы, то можно предложить использование готовых силицидов или мультислоев Si/Ni [16, 20, 21, 35, 55–61, 77, 78]. Однако, как показали исследования, хороший омический контакт получается только когда кремния в мультислоях недостаточно для стехиометрического состава Ni₂Si. Возможно, это объясняется существенной ролью вакансий кремния в процессе формирования контакта [79–81] или присутствием на границе раздела углеродной нанокристаллической фазы. С другой стороны, температурная стабильность контактов на основе силицидов выше остальных [82, 83] за счет менее интенсивных межфазных реакций и, как следствие, более резкой границы раздела «контактная металлизация — полупроводник».

Также на основе идеи о том, что ответственной за формирование омического контакта является углеродная нанокристаллическая фаза [23, 60, 68, 84–88], предложено формировать контакт на основе углеродного контактообразующего слоя [23]. При этом тоже были получе-

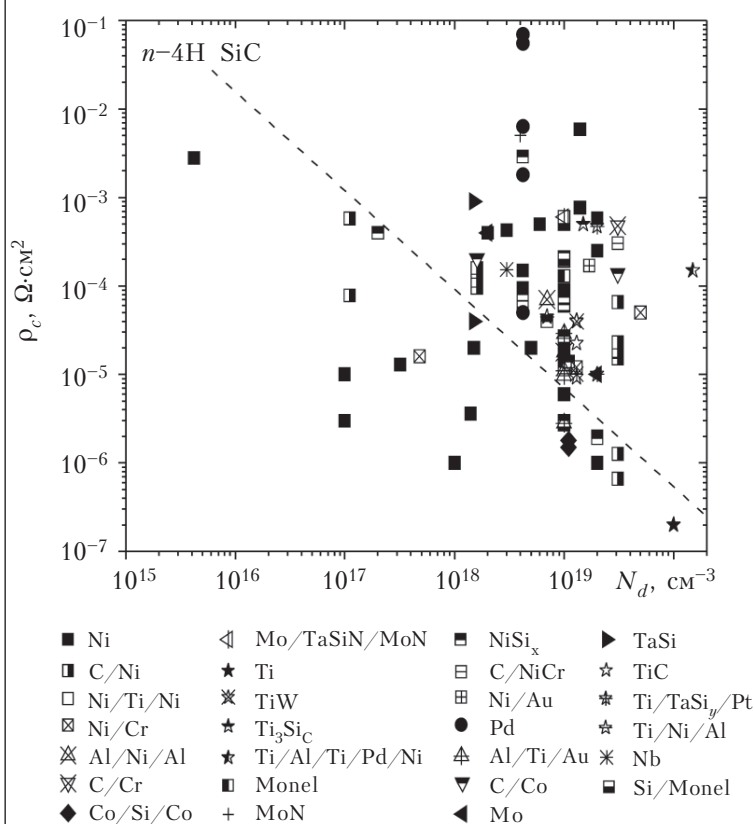


Рис. 4. Приведенные в [7, 16, 20, 21, 23, 24, 26, 32, 34, 35, 55–76] удельные сопротивления контактов к n -4H SiC при различных концентрациях легирования полупроводника

Таблица 5

Характеристики омических контактов хорошего качества к 4H SiC

Контакт	N_d , 10^{17} см^{-3}	$T_{\text{отж}}$, $^{\circ}\text{C}$	$\tau_{\text{отж}}$, мин	ρ_c , $10^{-6} \text{ Ом}\cdot\text{см}^2$	Источник
Al/Ti/Au	100	1050	5	2,80	[24]
C/Ni	310	800	120	0,66*	[55]
	1,1	1000		580*	
	310	700	120	1,26	[23]
	1,1	900		78,5	
	1,1	1000		575	
Co/Si/Co	110	800	3	1,5	[35]
			5	1,8	[57]
Ni	100	950	10	2,8	[20]
				3,0	[56]
				2,8	[57]
	1,0	950	н. д.	3,0	[34]
	200			1,0	[62]
	14			3,6	
	3,2	1100	1	13,0	
	15	950	3	20,0	[32]
	0,042	1000	1	2800	[57]
	200	950	5	2,0*	[55]
	100	950	10	2,7*	
	0,042	1000	1	2800*	
	100	1050	10	6,0*	[7]
	10	1050	5	1,0*	
	1,0			10,0*	
Ni/Cr	4,8	1100	3	16,0*	
Si/Ni	200	900	10	1,9	[57]
	2,0	1000	3	400	[21]
Si/Ni мультислои	100	950	10	3,0	[56]
TaSi	15	950	3	40,0	[32]

Примечания: н. д. — нет данных; * — в сообщении указано, что омический контакт наносился на Si-грань полупроводника

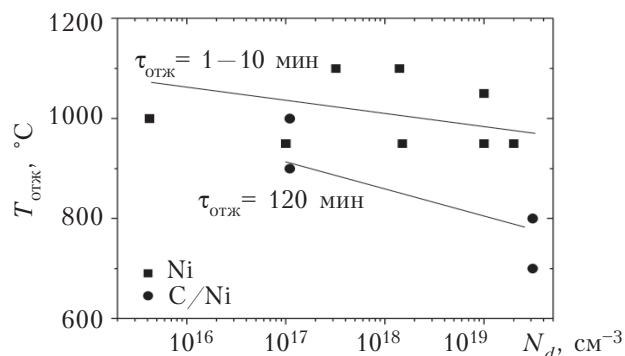


Рис. 5. Параметры отжига контактов на основе никеля к n -4H SiC при различных концентрациях легирования полупроводника (по данным табл. 5)

ны хорошие омические контакты в широком диапазоне концентраций, однако ни в этом, ни в предыдущем случае пока еще не удалось создать омический контакт с сопротивлением ниже, чем у лучших образцов контактов на основе чистого никеля. Как отмечают И. П. Никитина с соавторами в [55], формирование омического контакта может быть связано не с формированием силицидов никеля или углеродной фазы на границе раздела, а с позитивно заряженными вакансиями углерода в подконтактной области, образованными в процессе межфазных реакций между карбидом кремния и никелем.

С целью повысить термическую стойкость (стойкость к окислению) никелевого контакта предложено использование никелевых сплавов, в частности с хромом [7, 57, 89]. Лучшие результаты по удельному сопротивлению в этих контактах сравнимы с никелевыми. Оптимальный диапазон температуры отжига никелевых омических контактов можно увидеть из рис. 5: $T_{\text{отж}}$ составляет 1100–950 $^{\circ}\text{C}$ при $\tau_{\text{отж}}=1-10$ мин и 850–900 $^{\circ}\text{C}$ при $\tau_{\text{отж}}=120$ мин.

В числе других материалов контактных металлизаций присутствуют и силициды тугоплавких металлов (Ta, Co) и сплав AlTi. Как показано в [89], термическая стабильность контактов на основе AlTi ниже никелевых при сравнимой величине контактного сопротивления.

n -6H SiC

Результаты по политутипу 6H во многом схожи с полученными для контактов к 4H SiC. Здесь широко используются контакты на основе никеля и его силицидов, на основе углеродной пленки, карбида тантала (табл. 6). Особенностью же является создание контактов путем наращивания дополнительного слоя карбида кремния [36, 41]. Возможными причинами образования такого контакта называют образование избытка углерода на границе раздела «металл — нанесенный карбид кремния» [36] и образование варизонной структуры при нанесении карбида кремния кубической структуры на гексагональный 6H SiC [41]. Перспективными контактными металлами

Таблица 6

Характеристики омических контактов хорошего качества к n -6H SiC

Контакт	N_d , 10^{17} см^{-3}	$T_{\text{отж}}$, $^{\circ}\text{C}$	$\tau_{\text{отж}}$, мин	ρ_c , $10^{-6} \text{ Ом}\cdot\text{см}^2$	Источник
TaC/Au	230	1000	15	1,38	[38]
				1,4	[57]
				2,0	[38]
Nb	14	1100	10	3,0	[57]
Ni	70	950	2	0,7*	[98]
	78	925	2,5	4,0*	
	78	950	2	9,0*	
	200	950	5	6,0*	[103]
	90	950	2	2,0*	
	500	1000	5	0,4**	[98]
	4,5		0,3	0,9**	
	0,055	1065	10	1,0	[7]
	4,5	1000	0,3	170	[3]
	0,055	1065	10	52000	[72]
	4,5	1000	0,3	170	[64]
	9,8	1050	5	100	[19, 27]
	90	950	2	5,0	[55]
	80		2	5,0	[19, 27, 57]
	79		5	5,0	[62]
	18	950	10	10	[57]
3C SiC/Ni	20	1000	0,5	20	[34]
C/Ni	100	700	120	17*	[41]
Re	12,8	1000	120	1,26*	[84]
SiC/Al/Mo	3,0	1600	50	15*	[97]
Ni ₂ Si	0,055	1065	10	100**	[36]
		960		6300	[28]
		1070		8900	[28]
NiCr	3,2	1100	3	8000	[39]
W/Ti/Ni	9,8	1050	5	2,5	[57]
Ti	4,5	н. д.	н. д.	100	[19]
				20	[62]

Примечания: н. д. — нет данных; * — в сообщении указано, что омический контакт наносился на Si-грань полупроводника; ** — контакт наносился на C-грань.

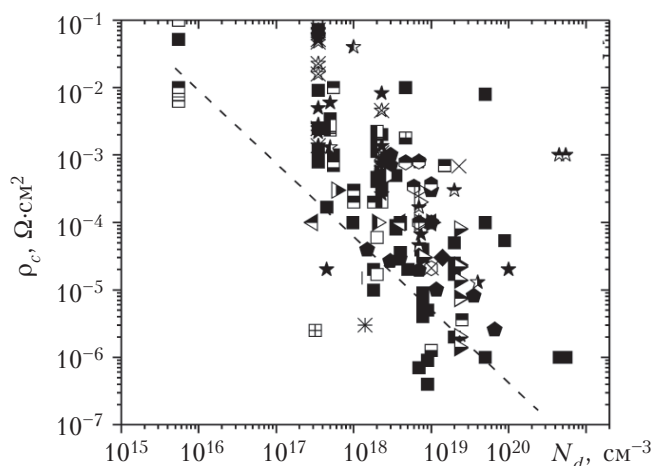


Рис. 6. Приведенные в [7, 16, 19, 27, 28, 32, 34, 36, 38, 41, 55–57, 61–67, 84, 90–103] удельные сопротивления контактов к n -6H SiC при различных концентрациях легирования полупроводника

также являются Re, Nb и Ti, образующие контакт, сопротивление которого сопоставимо с лучшими результатами для Ni и NiCr (рис. 6).

Оптимальными параметрами отжига никелевых контактов являются $T_{\text{отж}} = 950 - 1000^{\circ}\text{C}$, $\tau_{\text{отж}} = 2 - 10$ мин (рис. 7).

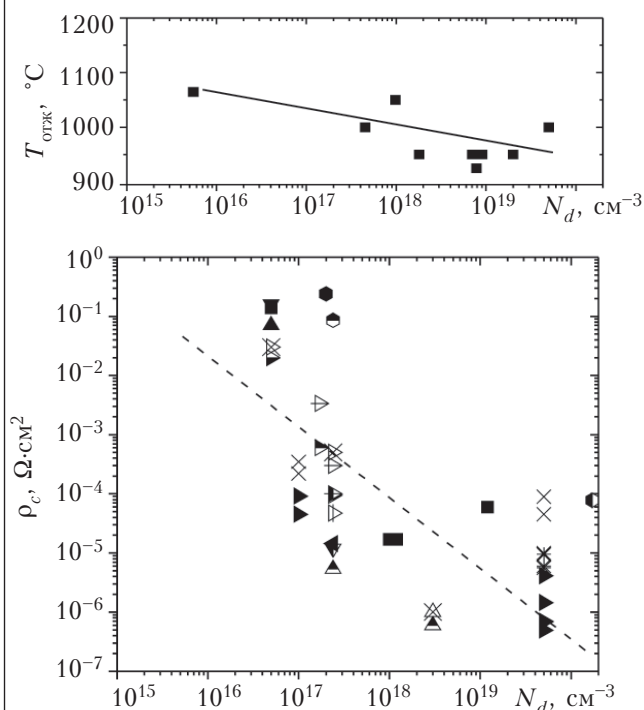
n -3C SiC

Политип 3C значительно отличается от рассмотренных выше как по параметрам, так и по наиболее часто используемым материалам для изготовления омических контактов к ним. Как видно из рис. 8, наиболее часто используемым контактным материалом в данном случае является тантал и его соединения [18, 19, 33].

Как показано в табл. 7, омический контакт к n -3C SiC формируют на основе Al, Cr, Mo, Ni, Re, Ta, Ti. Температура отжига таких контактов (кроме Cr и Ni) не превышает 500°C .

n -21R SiC

В [107, 108] приведены результаты исследований зависимости сопротивления омического контакта к 21R SiC от температуры отжига для никелевой контактной металлизации и показано, что оптимальная температура отжига составляет $1000 - 1100^{\circ}\text{C}$ при длительности 0,17 мин. Результаты, полученные при оптимальных параметрах отжига, приведены в табл. 8.


 Рис. 7. Параметры отжига контактов на основе никеля к n -6H SiC при различных концентрациях легирования полупроводника (по данным табл. 6)

■ Ni * Pt ▷ TaSiAu ▷ TaAuAl...Au
 ● W ● W/Au ● TiW ▷ TaWAl...Au
 × Re ▷ TaSi₂ × TaAu ▷ TaSi...Au
 ▷ Ta ▲ Cr/Au ▼ Al ▷ Ti/Ta/Si/Al/Au
 ▼ Al/Au ▲ Cr ◀ Mo/Au × Cr/Ti/Pt/Mo/Au

 Рис. 8. Приведенные в [7, 18, 19, 33, 62] удельные сопротивления контактов к n -3C SiC при различных концентрациях легирования полупроводника

Таблица 7

 Характеристики омических контактов хорошего качества к n -3C SiC

Контакт	N_d , 10^{17} см^{-3}	$T_{\text{отж}}$, °C	$\tau_{\text{отж}}$, мин	ρ_c , $10^{-6} \text{ Ом}\cdot\text{см}^2$	Источник
Ni	10	1000	0,5	17	[19]
	12			17*	[62]
Re	1,0	—	—	350	[18]
		500	30	220	
Ta	500	—	—	0,69	
		500	30	0,50	
	1,0	—	—	45	
		500	30	91	
	500	1000	60	0,70	
	500	1000	60	0,70	[19]
(Ta/W/Au)Au	1,7	400	10	600	[33]
Al/Au	2,4	—	—	11,9	
Cr/Au	2,4	200	10	5,35	
Mo/Au		300		14,4	
Ti/Ta/Si/Al/Au		200		47	
(Ta/Au/Al)/Au		300		94,3	
(Ta/Si)/Au		400		100	
Ta/Au/Si/(Ta/Au)/Ta/Au		400		300	
Cr/Au	30	850	10	0,6	
Cr/Ti/Pt/Mo/Al				1,0	
Cr/Ti/Pt/Mo/Au				1,0	

* — в сообщении указано, что омический контакт наносился на Si-грань полупроводника

Таблица 8

 Характеристики омических контактов к n -21R SiC

Контакт	Грань	N_d , 10^{17} см^{-3}	$T_{\text{отж}}$, °C	$\tau_{\text{отж}}$, мин	ρ_c , $10^{-6} \text{ Ом}\cdot\text{см}^2$	Источник
Ni	C	20	1100	0,17	200	[107]
	Si	10			200	[108]

Омические контакты к карбиду кремния *p*-типа

p-4H SiC

Для формирования омического контакта к *p*-4H SiC в основном используют AlTi, где Al, как считается, выступает подлегирующим элементом. Среди других металлизаций нужно назвать AlTiNi, TiW, Pd, Ni, Al, Ti (рис. 9).

Оптимальными параметрами отжига контактной металлизации к *p*-4H SiC являются (табл. 9):

для AlTi $T_{отж}=1000-1050^{\circ}\text{C}$, $\tau_{отж}=2-5$ мин;

для Ni/Ti/Al $T_{отж}=800^{\circ}\text{C}$, $\tau_{отж}=2-30$ мин;

для NiAl $T_{отж}=1000^{\circ}\text{C}$, $\tau_{отж}=2$ мин.

Таблица 9

Характеристики омических контактов хорошего качества к *p*-4H SiC

Контакт	N_a , 10^{17} см ⁻³	$T_{\text{отж}}$, °C	$\tau_{\text{отж}}$, мин	ρ_c , 10^{-6} Ом·см ²	Источ- ник
AlTi	100	1000	2	10,0*	[120]
	130		2	5,0	[57]
			н. д.		[29]
	100		н. д.	49	[22]
	70		2	95	
Al/Ti/ Al	100	1050	5	5,0	[25]
Al/Ti/ Pt/Ni	80	1000	2	90	[30]
	70				[57]
Ni/Ti/ Al	60	800	30	66	[57]
	30		2	70,0	[31]
				100	
300					
TiAlGe	45	400	300	100	[116]
		600			[57]
Ni	300	1000	2	11	[115]
NiAl	60	1000	30	95	[57]
	100		2	7,9	[29]
				28	
				32	
				45	
		н. д.	95		
Pd	0,5	600	н. д.	20000	[119]
Ti	130	800	1	30,0	[57]
Co/Si/ Co	110	800	н. д.	1,5	[29]
TiC	100	500	3	20,0	[37]
TiW	1000	950	30	4,0	[7]
	60			120	
	60	980	3	40,0	[26]

Примечания: н. д. — нет данных; * — в сообщении указано, что омический контакт наносился на Si-грань полупроводника

p-6H SiC

Контактную металлизацию к *p*-6H SiC, как и к *p*-4H SiC, формируют в основном на основе AlTi с теми же условиями отжига (см. рис. 10, табл. 10). Перспективными также являются контакты на основе AlMo [57], силицидов титана и кобальта [57, 121–123].

p-3C SiC

В этом случае лучшие результаты по удельному контактному сопротивлению получают при

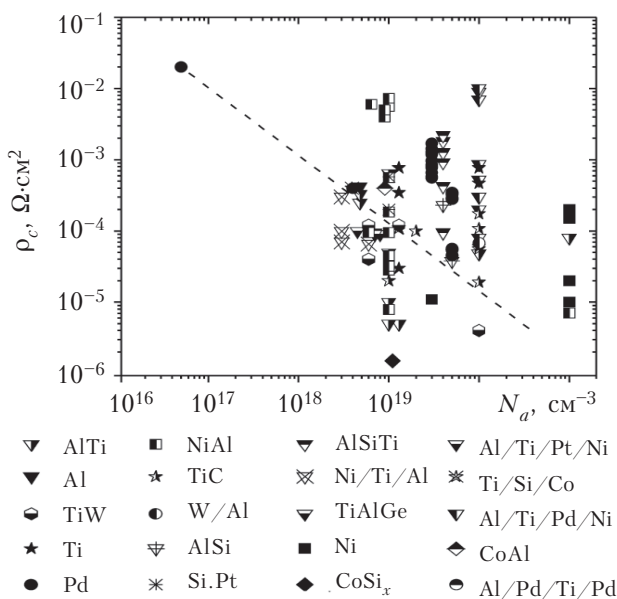


Рис. 9. Приведенные в [7, 22, 25, 26, 29, 30, 31, 37, 40, 57, 71, 89, 96, 109–119] удельные сопротивления контактов к *p*-4H SiC при различных концентрациях легирования полупроводника

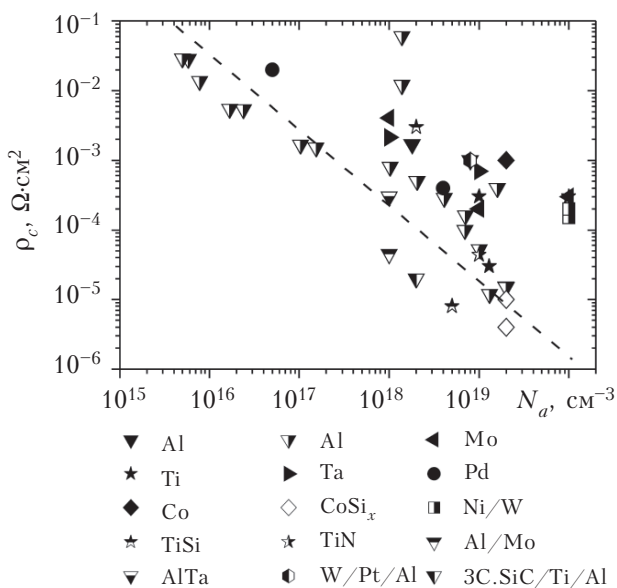


Рис. 10. Приведенные в [19, 40, 41, 57, 62, 63, 119, 121, 124–126] удельные сопротивления контактов к *p*-6H SiC при различных концентрациях легирования полупроводника

Таблица 10

Характеристики омических контактов хорошего качества к p -6H SiC

Контакт	N_a , 10^{17} см $^{-3}$	$T_{отж}$, °C	$\tau_{отж}$, мин	ρ_c , Ом·см 2	Источник
AlTi	130	1000	2	11,9	[40]
	1,5		5	1500	[126]
	1,0			1700	
	0,24			5300	
	0,18			5400	
	0,078			14000	
	0,058			29000	
	0,050			29000	[62]
AlTi/ 3C SiC*	20	950	2	20	[41]
Co/Si	200	900	120	4,0	[57]
TiSi	50	1000	1,5	8,0	[121]
Al/Mo	10	1200	0,67	45	[57]

Примечание: * — в сообщении указано, что омический контакт наносился на Si-грань полупроводника

использовании контактообразующих слоев с Al в разных комбинациях (табл. 11).

p -15R SiC

В табл. 12 представлены параметры контактов к p -15R SiC на основе Pd, сформированные при температуре 600°C.

Закключение

Анализ литературных данных показывает, что формирование омического контакта хорошего качества возможно к слоям карбида кремния не только при больших (10^{19} – 10^{20} см $^{-3}$), но и при малых ($5 \cdot 10^{15}$ – 10^{16} см $^{-3}$) концентрациях легирования [39], причем с уменьшением концентрации на порядок, на порядок возрастает и величина удельного контактного сопротивления.

В качестве контактной металлизации к n -4H SiC и n -6H SiC используют Ni, NiCr, NiSi $_x$, перспективными контактными металлами также являются Re, Nb и Ti.

К n -3C SiC наиболее часто используемым контактным материалом является тантал и его соединения. Качественный контакт формируют также на основе Al, Cr, Mo, Ni, Re, Ta, Ti. Температуры отжига таких контактов (кроме Cr и Ni) не превышают 500°C.

Лучшие результаты удельного контактного сопротивления к p -4H SiC, p -6H SiC, p -3C SiC получают при использовании контактообразующих слоев из AlTi и других алюминийсодержащих составов (AlTiNi, TiW), а к перспективным металлизациям здесь относятся Pd, Ni, Ti.

ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ

1. Лебедев А. А., Челноков В. Е. Широкозонные полупроводники для силовой электроники // ФТП. — 1999. —

Таблица 11

Характеристики омических контактов хорошего качества к p -3C SiC

Контакт	N_a , 10^{17} см $^{-3}$	$T_{отж}$, °C	$\tau_{отж}$, мин	ρ_c , Ом·см 2	Источник
Ni	10	700	15	0,028	[19]
Al	0,1	880	3	0,031	
Au/Ta/Al	0,1	1200	30	0,47	
TaSi $_2$ /Al				0,2	

Таблица 12

Характеристики омических контактов хорошего качества к p -15R SiC

Контакт	N_a , 10^{17} см $^{-3}$	ρ_c , Ом·см 2	Источник
Pd	0,5	0,02	[119]
	40	0,0004	

Т. 33, № 9. — С. 1096–1099. [Lebedev A. A., Chelnokov V. E. // FTP. 1999. Vol. 33, N 9. P. 1096]

2. Войтович В., Гордеев А., Думаневич А. Si, GaAs, SiC, GaN — силовая электроника. Сравнение, новые возможности // Силовая электроника. — 2010. — № 5. — С. 4–10. [Voitovich V., Gordeev A., Dumanevich A. // Silovaya elektronika. 2010. N 5. P. 4]

3. Лебедев А., Сбруев С. SiC электроника: прошлое, настоящее, будущее // Электроника: НТБ. — 2006. — № 5. — С. 28–41. [Lebedev A., Sbruev S. // Elektronika: NTB. 2006. N 5. P. 28]

4. Полищук А. Полупроводниковые материалы и приборы для жестких условий эксплуатации // Современная электроника. — 2006. — № 4. — С. 20–24. [Polishchuk A. // Sovremennaya elektronika. 2006. N 4. P. 20]

5. Лучинин В., Таиров Ю. Отечественный полупроводниковый карбид кремния: шаг к паритету // Современная электроника. — 2009. — № 7. — С. 12–15. [Luchinin V., Tairov Yu. // Sovremennaya elektronika. 2009. N 7. P. 12]

6. Neudeck P. G. Silicon Carbide Technology // In book: The VLSI Handbook. Second Ed. // Ed. by Wai-Kai Chen. — CRC Press LLC, 2006. — P. 1–34.

7. Lee Sang-Kwon. Processing and Characterization of Silicon Carbide (6H- and 4H-SiC) Contacts for High Power and High Temperature Device Applications / Ph.D Dissertation. — Stockholm, KTH, Royal Institute of Technology. — 2002.

8. NSM Archive — Physical Properties of Semiconductors [электронный ресурс] <http://www.matprop.ru>

9. Baliga B. J. Fundamentals of Power Semiconductor Devices. — NY.: Springer Science+Business Media, 2008.

10. Агеев О.А., Беляев А.Е., Болтовец Н.С. и др. Карбид кремния: технология, свойства, применение / Под ред. А. Е. Беляева и Р. В. Конаковой. — Харьков: ИСМА, 2010. [Ageev O.A., Belyaev A.E., Boltovets N.S. i dr. Karbid kremniya: tekhnologiya, svoystva, primeneniye / Pod red. A. E. Belyaeva i R. V. Konakovoi. Khar'kov: ISMA, 2010]

11. Cooper J.A. Critical material and processing issues of SiC electronic devices // Materials Science and Engineering. — 1997. — Vol. B44. — P. 387–391.

12. Goesmann F., Schmid-Fetzer R. Metals on 6H-SiC: contact formation from the materials science. Point of view // Materials Science and Engineering. — 1997. — Vol. B46. — P. 357–362

13. Агеев О. А. Физико-технологические основы формирования контактов к карбиду кремния методами импульсной термообработки / Дисс. ... докт. тех. наук. — Таганрог. — 2005. [Ageev O. A. / Diss. ... dokt. tekh. nauk. Taganrog. 2005]

14. Cooper J.A., Jr. Advances in SiC MOS Technology // Phys. Stat. Sol. (a). — 1997. — Vol. 162. — P. 305–320.
15. Rideout V.L. A review of the theory and technology for ohmic contacts to group III–V compound semiconductors // Solid State Electron. — 1975. — Vol. 18. — P. 541.
16. CichoH S., Mach6 P., Barda B., Machovi V., Slepika P. Raman study of Ni and Ni silicide contacts on 4H- and 6H-SiC // Thin Solid Films. — 2012. — Vol. 520. — P. 4378–4388.
17. Hara S. Characterization of the 6H-SiC (0001) surface and the interface with Ti layer with the Schottky limit // Applied Surface Science. — 2000. — Vol. 162–163. — P. 19–24.
18. Chen J.S., Baichli A., Nicolet M.-A et al. Contact resistivity of Re, Pt and Ta films on n-type 4H-SiC: preliminary results // Materials Science and Engineering B. — 1995. — Vol. 29. — P. 185–189.
19. Porter L. M., Davis R. F. A critical review of ohmic and rectifying contacts for silicon carbide // Materials Science and Engineering. — 1995. — Vol. B34. — P. 83–105.
20. Kakanakova-Georgieva A., Marinova Ts., Noblanc O. et al. Characterization of ohmic and Schottky contacts on SiC // Thin Solid Films. — 1999. — Vol. 343–344. — P. 637–641.
21. Kuchuk A.V., Guziewicz M., Ratajczak R. et al. Long-term stability of Ni-silicide ohmic contact to n-type 4H-SiC // Microel. Eng. — 2008. — Vol. 85. — P. 2142–2145.
22. Crofton J., Mohny S.E., Williams J.R., Isaacs-Smith T. Finding the optimum Al–Ti alloy composition for use as an ohmic contact to p-type SiC // Solid-State Electronics. — 2002. — Vol. 46, N 1. — P. 109–113.
23. Lu W., Mitchel W. C., Landis G. R. et al. Ohmic contact properties of Ni/C film on 4H-SiC // Solid-State Electronics. — 2003. — Vol. 47. — P. 2001–2010.
24. Chang S., Wang S., Uang K., Liou B. Investigation of Au/Ti/Al ohmic contact to N-type 4H-SiC // Solid-State Electron. — 2005. — Vol. 49. — P. 1937–1941.
25. Jennings M.R., Perez-Tomas A., Davies M. et al. Analysis of Al/Ti, Al/Ni multiple and triple layer contacts to p-type 4H-SiC // Solid-State Electronics. — 2007. — Vol. 51. — P. 797–801.
26. Lee S.-K., Zetterling C.-M., Ostling M. et al. Low resistivity ohmic contacts on 4H-silicon carbide for high power and high temperature device applications // Microel. Eng. — 2002. — Vol. 60. — P. 261–268.
27. La Via F., Roccaforte F., Makhtari A. et al. Structural and electrical characterisation of titanium and nickel silicide contacts on silicon carbide // Microelectronic Engineering. — 2002. — Vol. 60. — P. 269–282.
28. Barda B., Mach6c P., Cichona S., Kudrnova M. Thermal degradation of Ni-based Schottky contacts on 6H-SiC // Applied Surface Science. — 2011. — Vol. 257. — P. 4418–4421.
29. Vanga H., Lazar M., Brosselard P et al. Ni–Al ohmic contact to p-type 4H-SiC // Superlattices and Microstructures. — 2006. — Vol. 40. — P. 626–631.
30. Vassilevski K., Zekentes K., Tsagaraki K. et al. Phase formation at rapid thermal annealing of Al:Ti:Ni ohmic contacts on 4H-SiC // Materials Science and Engineering B. — 2001. — Vol. 80. — P. 370–373.
31. Konishi R., Yasukochi R., Nakatsuka O et al. Development of Ni/Al and Ni/Ti/Al ohmic contact materials for p-type 4H-SiC // Materials Science and Engineering B. — 2003. — Vol. 98. — P. 286–293.
32. Guziewicz M., Piotrowska A., Kaminska E. et al. Ta–Si contacts to n-SiC for high temperatures devices // Materials Sci. Eng. B. — 2006. — Vol. 135. — P. 289–293.
33. Constantinidis G., Kornilios N., Zekentes K. et al. High temperature ohmic contacts to 3C-SiC grown on Si substrates by chemical vapor deposition // Materials Science and Engineering B. — 1997. — Vol. 46. — P. 176–179.
34. Marinova Ts., Kakanakova-Georgieva A., Krastev V. et al. Nickel based ohmic contacts on SiC // Materials Sci. Eng. — 1997. — Vol. B46. — P. 223–226.
35. Yanga S.J., Kima C.K., Noha I.H. et al. Study of Co- and Ni-based ohmic contacts to n-type 4H-SiC // Diamond and Related Materials. — 2004. — Vol. 13. — P. 1149–1153.
36. Андреев А.Н., Бабанин А.И., Кузнецов А.Н. и др. Омические контакты к SiC-6H n-типа проводимости на основе тонких пленок карбида кремния, осажденных методом магнетронного распыления // ПЖТФ. — Т. 20, №18. — С.11–15. [Andreev A.N., Babanin A.I., Kuznetsov A.N. i dr. // PZhTF. Vol. 20, N 18, P.11]
37. Lee S.-K., Danielsson E., Zetterling C.-M et al. The formation and characterization of epitaxial titanium carbide contacts to 4H-SiC // Mat. Res. Soc. Symp. — 2000. — Vol. 622. — P. T6.9.1.
38. Jang T., Porter L.M., Rutsch G., Odekirk B. Tantalum carbide ohmic contacts to n-type silicon carbide // Appl. Phys. Lett. — 1999. — Vol. 75. — P. 3956–3958.
39. CichoH S., Barda B., Mach6 P. Ni and Ni Silicides Ohmic Contacts on n-type 6H-SiC with Medium and Low Doping Level // Radioengineering. — 2011. — Vol. 20, N. 1. — P. 209–213.
40. Nakatsuka O., Taker T., Koide Y., Murakami M. Low Resistance TiAl Ohmic Contacts with Multi-Layered Structure for p-Type 4H-SiC // Materials Transactions. — 2002. — Vol. 43, N 7. — P. 1684–1688.
41. Dmitriev V.A., Irvine K., Spencer M., Kelner G. Low resistivity ($10^{-5} \text{ W} \cdot \text{cm}^2$) ohmic contacts to 6H silicon carbide fabricated using cubic silicon carbide contact layer // Appl. Phys. Lett. — 1994. — Vol. 64. — P. 318–320.
42. Hara S., Teraji T., Okushi H., Kajimura K. Control of Schottky and ohmic interfaces by unpinning Fermi level // Applied Surface Science. — 1997. — Vol. 117/118. — P. 394–399.
43. Zhongchang Wang, Mitsuhiro Saito, Susumu Tsukimoto, Yuichi Ikuhara Terraces at ohmic contact in SiC electronics: Structure and electronic states // J. Appl. Phys. — 2012. — Vol. 111. — P. 113717 (8p).
44. Калинина Е. В. Управление электрофизическими параметрами слоев карбида кремния и создание приборов для эксплуатации в экстремальных условиях // Дисс. ... докт. физ.-мат. наук. — Санкт-Петербург. — 2008. [Kalinina E. V. / Diss. ... dokt. fiz.-mat. nauk. Sankt-Peterburg. 2008]
45. Ayalew T. SiC Semiconductor Devices Technology, Modeling, and Simulation / Diss. Dokt. techn. Wissenschaften. — Wien, Österreich. — 2004.
46. Давыдов С.Ю. Роль дефектов в формировании локальных состояний, наведенных атомами, адсорбированными на поверхности полупроводников // ФТП. — 1997. — Т. 31, N10. — С. 1236–1241. [Davydov S.Yu. // FTP. 1997. Vol. 31, N 10. P. 1236]
47. Aubry-Fortuna V., Perrossier J.-L., Mamor M. et al. What is the role of the metal on the Fermi-level position at the interface with IV-IV compounds? // Microelectronic Engineering. — 1997. — Vol. 37/38. — P. 573–579.
48. Bozack M. J. Surface studies on SiC as related to contacts // Phys. stat. sol. (b). — 1997. — Vol. 202. — P. 549–573.
49. Forbeaux I., Themlin J.-M., Charrier A. et al Solid-state graphitization mechanisms of silicon carbide 6H-SiC polar faces // Applied Surface Science. — 2000. — Vol. 162–163. — P. 406–412.
50. Eichfeld C.M., Horsey M.A., Mohny S.E. et al. Ta–Ru–N diffusion barriers for high-temperature contacts to p-type SiC // Thin Solid Films. — 2005. — Vol. 485. — P. 207–211.
51. Кудрик Я.Я. Удельное сопротивление омических контактов в структурах металл–полупроводник // Петербургский журнал электроники. — 2010. — №1. — С.25–40. <http://www.detimes.net/images/stories/Stat/Methods.pdf> [Kudrik Ya.Ya. // Peterburgskii zhurnal elektroniki. 2010. N1. P.25]
52. Kupka R. K., Anderson W. A. Minimal ohmic contact resistance limits to n-type semiconductors // Appl. Phys. — 1991. — Vol. 69, N6. — P. 3623–1–10.
53. Давыдов С.Ю., Лебедев А.А., Посредник О.В., Тайров Ю.М. Контакт металл-карбид кремния: зависимость высоты барьера Шоттки от полигона SiC // ФТП. — 2001. — Т. 35, N 12. — С. 1437–1439. [Davydov S.Yu., Lebedev A.A., Posrednik O.B., Tairov Yu.M. // FTP. 2001. Vol. 35, N 12. P. 1437]
54. Давыдов С.Ю. Лебедев А.А., Тихонов С.К. К расчету высоты барьера Шоттки на начальной стадии формирования контакта <карбид кремния>-<субмонослойная пленка металла> // ФТП. — 1998. — Т. 32, N 1. — С. 68–71. [Davydov S.Yu. Lebedev A.A., Tikhonov S.K. // FTP. 1998. Vol. 32, N 1. P. 68]
55. Nikitina P., Vassilevski K. V., Wright N. G. et al. Formation and role of graphite and nickel silicide in nickel based

- ohmic contacts to n-type silicon carbide // J. Appl. Phys. — 2005. — Vol. 97. — P. 083709-1—083709-7.
56. B. Pecz Contact formation in SiC devices // Applied Surface Science — 2001. — N 18. — P. 287–294.
57. SiC materials and devices / Ed. by M. Shur, S. Rumyantsev, M. Levinstein. — Singapore: Mainland Press, 2006.
58. Barda B., Mach6c P., Cichona S. et al. Origin of ohmic behavior in Ni, Ni₂Si and Pd contacts on n-type SiC // Applied Surface Science — 2010. — Vol. 257. — P. 414–422.
59. Mach6c P., Barda B. Improvement of Ni/Si/4H-SiC ohmic contacts by VLS grown sub-contact layer // Microel. Eng. — 2010. — Vol. 87. — P. 2499–2503.
60. Maeyama Y., Nishikawa K., Fukuda Y. et al. Ohmic Contact for C-face n-type 4H-SiC with Reduced Graphite Precipitation // Mater. Sci. Forum. — 2006. — Vols. 527–529. — P. 867–870.
61. Kuchuk A. V., Kladko V. P., Golaszewska K. et al. The Formation Mechanism of Ni-Based Ohmic Contacts to 4H-n-SiC // Silicon Carbide and Related Materials. — 2011. — Vols. 717–720. — P. 833–836.
62. Saxena V., Steckl A. J. Building Blocks for SiC Devices: Ohmic Contacts, Schottky Contacts and p-n Junctions. Chapter 3. // In book: Semiconductors and Semimetals, Vol. 52 // Ed. by Y. S. Park. — Academic Press, 1998.
63. Okojie R. S. A Novel Tungsten-Nickel Alloy Ohmic Contact to SiC at 900 °C // IEEE electron device letters. — 2010. — Vol. 31, N 8. — P. 791–793.
64. 31nar K., Coskun C., Gьr E., Aydogan S. Radiation effects on ohmic and Schottky contacts based on 4H and 6H-SiC // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B. — 2009. — Vol. 267. — P. 87–90.
65. Cichon S., Mach6c P., Barda B., Sofer Z. Influence of different SiC surface treatments performed prior to Ni ohmic contacts formation // Microel. Eng. — 2011. — Vol. 88. — P. 553–556.
66. Okojie R. S., Lukco D., Chen Y. L., Spry D. J. Reliability assessment of Ti/TaSi₂/Pt ohmic contacts on SiC after 1000 h at 600°C // J. Appl. Phys. — 2002. — Vol. 91. — P. 6553–6559.
67. Evans L. J., Okojie R. S., Lukco D. Development of an Extreme High Temperature n-type Ohmic Contact to Silicon Carbide // Materials Sci. Forum. — Vols. 717–720. — P. 841–844.
68. Lu W., Mitchel W. C., Landis G. R. et al. Catalytic graphitization and ohmic contact formation on 4H-SiC // J. Appl. Phys. — 2003. — Vol. 93. — P. 5397–5403.
69. Rastegaeva M.G., Syrkin A.L. Electrical characteristics of tungsten-contacts to 6H-SiC at temperatures between 300 and 950 K // Sensors and Actuators A. — 1992. — Vol. 33. — P. 95–96.
70. Jung K., Sutou Y., Koike J. Improved microstructure and ohmic contact of Nb electrode on n-type 4H-SiC // Thin Solid Films. — 2012. — Vol. 520, N 23. — P. 6922–6928.
71. Lee S.-K., Zetterling C.-M., Ostling M. et al. Low resistivity ohmic titanium carbide contacts to n- and p-type 4H-silicon carbide // Solid-State Electronics. — 2000. — Vol. 44. — P. 1179–1186.
72. Guy O.J., Pope G., Blackwood I. et al. Creating room temperature Ohmic contacts to 4H-SiC: studied by specific contact resistance measurements and X-ray photoelectron spectroscopy // Surf. Sci. — 2004. — Vol. 573. — P. 253–263.
73. Бланк Т.В., Гольдберг Ю.А., Поссе Е.А., Солдатенков Ф.Ю. Механизм протекания тока в омическом контакте к n-4H-SiC // ФТП. — 2010. — Т. 44, № 4. — С. 482–485. [Blank T.V., Gol'dberg Yu.A., Posse E.A., Soldatenkov F.Yu. // FTP. 2010. Vol. 44, N 4. P. 482]
74. Василевский К.В., Zekentes K., Редакова С.В. и др. Электрические характеристики и структурные свойства омических контактов к эпитаксиальным слоям 4H-SiC с дырочной проводимостью // ФТП. — 1999. — Т. 33, № 11. — С. 1334. [Vasilevskii K.B., Zekentes K., Reidakova C.B. i dr. // FTP. 1999. Vol. 33, N 11. P. 1334]
75. Buchholt K., Ghandi R., Domeij M. et al. Ohmic contact properties of magnetron sputtered Ti₃SiC₂ on n- and p-type 4H-silicon carbide // Applied physics letters. — 2011. — Vol. 98. — P. 042108 (3 p)
76. Бланк Т.В., Гольдберг Ю.А. Механизмы протекания тока в омических контактах металл-полупроводник // ФТП. — 2007. — Т. 41, № 11. — С. 1281–1308. [Blank T.V., Gol'dberg Yu.A. // FTP. 2007. Vol. 41, N 11. P. 1281]
77. Мьюрарка Ш. Силициды для СБИС. — Москва: Мир, 1986. [M'yurarka Sh. Silitsidy dlya SBIS. Moskva: Mir, 1986]
78. Meyer B., Gottlieb U., Laborde O. et al Intrinsic properties of NiSi // J. Alloys and Compounds. — 1997. — Vols. 262–263. — P. 235–237.
79. Давыдов С.Ю., Лебедев А.А., Посредник О.В., Тайров Ю.М. Роль вакансий кремния в формировании барьеров Шоттки на контактах Ag и Au с 3С- и 6H-SiC // ФТП. — 2002. — Т. 36, № 6. — С. 690–692. [Davydov S.Yu., Lebedev A.A., Posrednik O.V., Tairov Yu.M. // FTP. 2002. Vol. 36, N 6. P. 690]
80. Tsai C.J., Yu K.H. Stress evolution during isochronal annealing of Ni/Si system // Thin Solid Films. — 1999. — Vol. 350. — P. 91–95.
81. Давыдов С.Ю., Посредник О. В. О влиянии вакансий в подрешетках кремния и углерода на формирование барьера Шоттки на контакте металл-SiC // ФТП. — 2006. — Т. 40, № 3. — С. 304–306. [Davydov S.Yu., Posrednik O. V. // FTP. 2006. Vol. 40, N 3. P.304]
82. Kuchuk A.V., Guzewicz M., Ratajczak R. et al Thermal degradation of Au/Ni₂Si/n-SiC ohmic contacts under different conditions // Mat. Sci. Eng. — 2009. — Vol. B 165. — P. 38–41.
83. Julies B.A., Knoesen D., Pretorius R., Adams D. A study of the NiSi to NiSi₂ transition in the Ni-Si binary system // Thin Solid Films. — 1999. — Vol. 347. — P. 201–207.
84. Lu W., Michel J. A., Lukehart C. M et al. Ni Graphite Intercalated Compounds in Ohmic Contact Formation on SiC. // Mat. Sci. Forum. — 2006. — Vols. 527–529. — P. 863–866.
85. La Via F., Roccaforte F., Raineri V. et al Schottky-ohmic transition in nickel silicide/SiC-4H system: is it really a solved problem? // Microelectronic Engineering. — 2003. — Vol. 70. — P. 519–523.
86. Александров О. В., Козловский В. В. Моделирование взаимодействия никеля с карбидом кремния при формировании омических контактов // ФТП. — 2009. — Т. 43, № 7. — С. 917–923. [Aleksandrov O. V., Kozlovskii V. V. // FTP. 2009. Vol. 43, N 7. P. 917]
87. Козловский В.В., Иванов П.А., Румянцев Д.С. и др. Стимулирование металлургических реакций на интерфейсе Ni-SiC протонным облучением // ФТП. — 2004. — Т. 38, № 4. — С. 778–783. [Kozlovskii V.V., Ivanov P.A., Rumyantsev D.S. i dr. // FTP. 2004. Vol. 38, N 4. P. 778]
88. Seyller Th., Emtsev K. V., Speck F. et al Schottky barrier between 6H-SiC and graphite: Implications for metal/SiC contact formation // Applied Physics Letters. — 2006. — Vol. 88. — P. 242103-1–3.
89. Adedeji A.V., Ahyi A.C., Williams J.R et al. Composite Ohmic Contacts to SiC // Materials Science Forum. — 2006. — Vols. 527–529. — P. 879–882
90. Rastegaeva M.G., Syrkin A. L. Electrical characteristics of tungsten-contacts to 6H-SiC at temperatures between 300 and 950 K // Sensors and Actuators A. — 1992. — Vol. 33. — P. 95–96.
91. Kriz J., Gottfried K., Kaufmann C., Gessner T. Determination of ohmic contacts to n-type 6H- and polycrystalline 3C-SiC using circular transmission line structures // Diamond and Related Materials. — 1998. — Vol. 7. — P. 77–80.
92. Barda B, Mach6c P, Hubickov6 M. Ti and Ti/Sb ohmic contacts on n-type 6H-SiC // Microelectronic Engineering. — 2008. — Vol. 85. — P. 2022–2024.
93. Mach6c P, Barda B, Kudrnov6 M. Role of titanium in Ti/Ni ohmic contact on n-type 6H-SiC // Microelectronic Engineering. — 2010. — Vol. 87. — P. 274–277.
94. Roccaforte F., LaVia F., Raineri V. et al. Improvement of high temperature stability of nickel contacts on n-type 6H-SiC // Applied Surface Science. — 2001. — Vol. 184. — P. 295–298.
95. Yang H., Peng T. H., Wang W. J et al. Interface metallization and electrical characterization of Ta-Pt multilayers on n-type SiC // Applied Surface Science. — 2008. — Vol. 255. — P. 3121–3125.
96. Kolaklieva L., Kakanakov R., Marinova Ts., Lepoeva G. Effect of metall composition on the electrical and thermal properties of Au/Pd/Ti/Pd contacts to p-type SiC // Materials Science Forum. — 2005. — Vols. 483–485. — P. 749–752.
97. McDaniel G. Y., Fenstermaker S. T., Lampert W. V., Holloway P. H. Rhenium ohmic contacts on 6H-SiC // J. Appl. Phys. — 2004. — Vol. 96. — P. 5357–5364.
98. Crofton J., McMullin P. G., Williams J. R., Bozack M. J. Hightemperature ohmic contact to ntype 6H-SiC using nickel // J. Appl. Phys. — 1995. — Vol. 77. — P. 1317–1319.

99. Рыжук Р. В. Разработка и исследование технологических основ формирования диодных ионно-легированных структур на основе карбида кремния / Дисс. ... канд. техн. наук. – Таганрог. – 2010. [Ryzhuk R. V. / Diss. ... kand. tekhn. nauk. Taganrog. 2010]
100. Okojie R. S., Spay D., Krotine J. et al Stable Ti/TaSi₂/Pt ohmic contacts on n-type 6H-SiC epilayer at 600 °C in air // Mat. Res. Soc. Symp. Proc. – 2000. – Vol. 622. – P. 1–7.
101. Chaddha A.K., Parsons J.D., Kruaval G.B. Thermally stable, low specific resistance (1,30''10⁻⁵ &''cm²) TiC Ohmic contacts to n-type 6H a-SiC // Appl. Phys. Lett. – 1995. – Vol. 66. – P. 760–762.
102. Lundberg N., Ostling M. CoSi₂ ohmic contacts to n-type 6H-SiC // Solid State Electronics. – 1995. – Vol. 38. – P. 2023–2028.
103. Jang T., Rutsch G., Odekirk B., Porter L.M. A comparison of single- and multi- layer ohmic contacts based on tantalum carbide on n-type and Osmium on p-type silicon carbide at elevated temperatures // Material Science Forum. – 2000. – Vol. 338324. – P. 100–1004.
104. Hara S., Teraji T., Okushi H., Kajimura K. Pinning-controlled ohmic contacts: application to SiC(0001) // Applied Surface Science. – 1996. – Vol. 107. – P. 218–221.
105. Rastegaeva M.G., Andreev A.N., Petrov A.A. et al. The influence of temperature treatment on the formation of Ni-based Schottky diodes and ohmic contacts to n-6H SiC // Materials Science and Engineering. – 1997. – Vol. B46. – P. 254–258.
106. Андреев А.Н., Растегаева М.Г., Растегаев В.П., Решанов С.А. К вопросу об учете растекания тока в полупроводнике при определении переходного сопротивления омических контактов // ФТП. – 1998. – Т. 32, № 7. – С. 832–838. [Andreev A.N., Rastegaeva M.G., Rastegaev V.P., Reshanov S.A. // FTP. 1998. Vol. 32, N 7. P. 832]
107. Литвинов В.Л., Демаков К.Д., Агеев О.А. и др. Особенности формирования и характеристики диодов Шоттки Ni/21R-SiC // ФТП. – 2003. – Т. 37, № 4. – С. 473–478. [Litvinov V.L., Demakov K.D., Ageev O.A. i dr. // FTP. 2003. Vol. 37, N 4. P.473]
108. Litvinov V.L., Demakov K.D., Ageev O.A et al. MileninEvolution of structural and electrophysical parameters of Ni/SiC contacts at rapid thermal annealing // Semiconductor Physics, Quantum Electronics & Optoelectronics. – 2002. – Vol. 5, N 4. – P. 457–464.
109. Downey B. P., Mohney S. E., Clark T. E., Flemish J. R. Reliability of aluminum-bearing ohmic contacts to SiC under high current density // Microelectronics Reliability. – 2010. – Vol. 50. – P. 1967–1972.
110. Johnson B. J., Capano M. A. The effect of titanium on Al-Ti contacts to p-type 4H-SiC // Solid-State Electronics. – 2003. – Vol. 47. – P. 1437–1441.
111. Kakanakov R, Kassamakova L, Kassamakov I et al. Improved Al:Si ohmic contacts to p-type 4H-SiC // Materials Science and Engineering B. – 2001. – Vol. 80. – P. 374–377.
112. Kassamakova L., Kakanakov R, Nordell N et al. Study of the electrical, thermal and chemical properties of Pd ohmic contacts to p-type 4H-SiC: dependence on annealing conditions // Materials Science and Engineering B. – 1999. – Vol. 61–62. – P. 291–295.
113. Vassilevski K. V., Constantinidis G., Papanicolaou N et al. Study of annealing conditions on the formation of ohmic contacts on p 4H-SiC layers grown by CVD and LPE // Materials Science and Engineering B. – 1999. – Vol. 61–62. – P. 296–300.
114. Wang S. H., Arnold O, Eichfeld C. M et al. Tantalum-Ruthenium Diffusion Barriers for Contacts to SiC // Materials Science Forum. – 2006. – Vols. 527–529. – P. 883–886
115. Crofton J., Williams J.R., Adedeji A.V et al. Ohmic Contacts to P-Type Epitaxial and Implanted 4H-SiC // Materials Science Forum. – 2006. – Vols. 527–529. – P. 895–898.
116. Sakai T., Nitta K., Tsukimoto S et al. Ternary TiAlGe ohmic contacts for p-type 4H-SiC // J. Appl. Phys. – 2004. – Vol. 95. – P. 2187–2189.
117. Kassamakova L., Kakanakov R. D., Kassamakov I. V. et al Temperature Stable Pd Ohmic Contacts to p-Type 4H-SiC Formed at Low Temperatures // IEEE Transactions on electron devices. – 1999. – Vol. 46. – P. 605–611.
118. Papanicolaou N.A., Edwards A., Rao M.V., Anderson W.T. Si/Pt Ohmic contacts to p-type 4H-SiC // Appl. Phys. Lett. – 1998. – Vol. 73. – P. 2009–2011.
119. Kalinina E.V., Kholuyanov G.F., Shchukarev A.V. et al. Pd ohmic contacts to p-SiC 4H, 6H and 15R polytypes // Diamond and Related Materials. – 1999. – Vol. 8. – P. 1114–1117.
120. Mohney S.E., Hull B.A., Lin J.Y., Crofton J. Morphological study of the Al-Ti ohmic contact to p-type SiC // Solid-State Electronics. – 2002. – Vol. 46. – P. 689.
121. Getto R., Freytag J., Kopnarski M., Oechsner H. Characterization of sputtered titanium silicide ohmic contacts on n-type 6H-silicon carbide // Materials Science and Engineering B. – 1999. – Vols. 61–62. – P. 270–274.
122. Nava F., Mazzega E., Michelini M. Analysis of the electrical resistivity of Ti, Mo, Ta, and W monocrystalline disilicides // J. Appl. Phys. – 1989. – Vol. 65. – P. 1584–1590.
123. Loopstra O.B., Sloof W.G., de Keijser Th. H. et al Composition, microstructure, and properties of crystalline molybdenum silicide thin films produced by annealing of amorphous Mo/Si multilayers // J. Appl. Phys. – 1988. – Vol. 63. – P. 4960–4969.
124. Nennewitz O., Spiess L., Breternitz V. Ohmic contacts to p-type 6H-SiC-silicon carbide // Applied Surface Science. – 1995. – Vol. 91. – P. 347–351.
125. Растегаева М. Г. Омические контакты металл-карбид кремния / Дисс. ... канд. техн. наук. – С.-Петербург. – 1999. [Rastegaeva M. G. / Diss. ... kand. tekhn. nauk. S.-Peterburg. 1999]
126. Crofton J., Barnes P.A., Williams J.R., Edmond J.A. Contact resistance measurements on p-type 6H-SiC // Appl. Phys. Lett. – 1993. – Vol. 62. – P. 384–386.

Дата поступления рукописи
в редакцию 30.07 2012 г.

Kudryk Ya.Ya., Bigun R. I., Kudryk R. Ya. **Manufacturing technology for contacts to silicon carbide.**

Key words: ohmic contact, SiC.

The authors classified the results of investigations of resistivity of ohmic contacts to silicon carbide made without any semiconductor surface modification. A set of contacts with better parameters were analysed. From the results of this analysis, some recommendations were made concerning optimal contact-forming layers for p- and n-SiC types of 4H, 6H, 3C, 15R, 21R polytypes.

Ukraine, Kiev, V. Lashkaryov Institute of Semiconductor Physics, NASU; Ivan Franko National University of Lviv.

Кудрик Я. Я., Бігун Р. І., Кудрик Р. Я. **Технологія виготовлення контактів до карбіду кремнію.**

Ключові слова: омичний контакт, SiC

Систематизовано наявні в різних публікаціях результати досліджень питомого опору омичних контактів до карбіду кремнію, виготовлених без будь-якої модифікації поверхні напівпровідника. Проведено аналіз групи контактів з найкращими параметрами, і на основі його результатів зроблені рекомендації щодо оптимальних контактостворюючих шарів для p- та n-типів SiC політіпів 4H, 6H, 3C, 15R, 21R.

Україна, м. Київ, Інститут фізики напівпровідників ім. В. Є. Лашкарьова НАНУ; Львівський національний університет ім. І. Я. Франко.