



<http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2020-18-1-81-88>

Оригинальная статья
Original paper

УДК 544.654.2

ВЛИЯНИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ БЫСТРОЙ ТЕРМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ НА ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ПЛЕНОК НИКЕЛЯ НА КРЕМНИИ

СОЛОВЬЁВ Я.А., ПИЛИПЕНКО В.А.

ОАО «ИНТЕГРАЛ» – управляющая компания холдинга «ИНТЕГРАЛ» (г. Минск, Республика Беларусь)

Поступила в редакцию 9 января 2020

© Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, 2020

Аннотация. Работа посвящена установлению закономерности изменения удельного сопротивления и высоты барьера Шоттки пленок никеля на кремнии *n*-типа (111) при их быстрой термообработке в диапазоне температур от 200 до 550 °С. Пленки никеля толщиной порядка 60 нм наносили магнетронным распылением на кремниевые подложки с удельным сопротивлением 0,58–0,53 Ом×см. Быструю термообработку проводили в интервале от 200 до 550°С в режиме теплового баланса облучением обратной стороны подложек некогерентным световым потоком в среде азота в течение 7 с. Толщину пленок никеля определяли растровой электронной микроскопией. Поверхностное сопротивление образцов измеряли четырехзондовым методом. Высоту барьера Шоттки определяли методом вольтамперных характеристик. Показано, что при температурах быстрой термообработки Ni/n-Si (111) 200–250 °С Ni преобразуется в Ni₂Si, увеличиваясь в толщине в 1,15–1,33 раза, удельное сопротивление увеличивается до 26–30 мкОм×см, а высота барьера Шоттки уменьшается с 0,66 до 0,6 В. При температуре быстрой термообработки 300 °С толщина исходной пленки никеля увеличивается в 1,93 раза, удельное сопротивление и высота барьера Шоттки снижаются до 26–30 мкОм×см и 0,59 В, соответственно, что обусловлено преобразованием Ni₂Si в NiSi и фиксацией высоты барьера поверхностными состояниями на границе раздела силицида с кремнием. Быстрая термообработка при температурах 350–550 °С переводит исходную пленку никеля в NiSi, увеличивает ее толщину в 2,26–2,67 раза, уменьшает ее удельное сопротивление до 15–18 мкОм×см, и увеличивает высоту барьера Шоттки до 0,62–0,64 В. Наименьшей дефектностью и лучшей воспроизводимостью электрофизических свойств характеризуются пленки NiSi, сформированные быстрой термообработкой пленок никеля на кремнии при температуре 400–450°С. Полученные результаты могут быть использованы в технологии создания изделий интегральной электроники с выпрямляющими контактами.

Ключевые слова: никель, силицид никеля, быстрая термообработка, удельное сопротивление, высота барьера.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Для цитирования. Соловьёв Я.А., Пилипенко В.А. Влияние температуры быстрой термической обработки на электрофизические свойства пленок никеля на кремнии. Доклады БГУИР. 2020; 18(1): 81-88.

EFFECT OF RAPID THERMAL TREATMENT TEMPERATURE ON ELECTROPHYSICAL PROPERTIES OF NICKEL FILMS ON SILICON

JAROSLAV A. SOLOVJOV, VLADIMIR A. PILIPENKO

JSC "INTEGRAL" – "INTEGRAL" Holding Managing Company (Minsk, Republic of Belarus)

Submitted 9 January 2020

© Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics, 2020

Abstract. Present work is devoted to determination the regularity of change of specific resistance and Schottky barrier height of nickel films on n-type silicon (111) at their rapid thermal treatment in the temperatures range from 200 to 550 °C. Nickel films of about 60 nm thickness were deposited by magnetron sputtering onto the silicon substrates having a resistivity of 0.58 to 0.53 Ohm×cm. The rapid thermal treatment was carried out in the range of 200 to 550 °C under heat balance mode by irradiating the backside of the substrates with non-coherent light flux in nitrogen ambient for 7 seconds. The thickness of the nickel films was determined by scanning electron microscopy. The sheet resistance of the samples was measured by a four-probe method. The Schottky barrier height was determined from I-V plots. It is shown that at a temperature of rapid thermal treatment of Ni/n-Si (111) 200–250 °C nickel will be transformed to Ni₂Si, increasing in thickness by 1.15–1.33 times, specific resistance increases to 26–30 μOhm×cm, and Schottky barrier height decreases from 0.66 to 0.6 V. At a rapid thermal treatment temperature of 300°C the initial nickel film thickness increases by 1.93 times, the resistivity and Schottky barrier height decrease to 26–30 μOhm×cm and 0.59 V respectively due to the conversion of the Ni₂Si into NiSi and the fixation of the barrier height by surface states at the silicide-silicon interface. Rapid thermal treatment of 350–550 °C transforms the original nickel film into NiSi, increases its thickness by 2.26–2.67 times, reduces its resistivity to 15–18 μOhm×cm and increases the Schottky barrier height to 0.62–0.64 V. The minimum defects and better reproducibility of electrophysical properties are characterized by NiSi films formed by rapid thermal treatment of nickel films on n-type silicon at a temperature of 400–450 °C. The results obtained can be used in the technology of integrated electronics products containing rectifying contacts.

Keywords: nickel, nickel silicide, rapid thermal treatment, specific resistance, barrier height.

Conflict of interests. The authors declare no conflict of interests.

For citation. Solovjov Ja.A., Pilipenko V.A. Effect of rapid thermal treatment temperature on electrophysical properties of nickel films on silicon. Doklady BGUIR. 2020; 18(1): 81-88.

Введение

Тонкие слои силицида никеля нашли широкое применение в технологии изделий интегральной электроники в качестве материалов полицидных затворов и контактов к истокам-стокам транзисторов в КМОП – технологии с проектными нормами менее 90 нм благодаря своим низким значениям удельного и контактного сопротивления [1]. Кроме того, низкое контактное сопротивление делает данный материал перспективным для применений в качестве контактных структур в силовой электронике и солнечных элементах [2, 3], а величина барьера Шоттки на кремнии n-типа порядка 0,63–0,65 В позволяет им находить применение в качестве материала выпрямляющего контакта в силовых диодах Шоттки [4]. Наиболее широко распространенным методом получения слоев силицида никеля является их диффузионный синтез путем последовательного нанесения на кремниевую подложку тонкой металлической пленки и температурной обработки для формирования слоя силицида твердофазной реакцией с кремнием [5]. Учитывая тот факт, что в изделиях силовой электроники требуется получать однородные и бездефектные слои силицидов большой площади, то наиболее подходящим для данных целей методом нагрева при их диффузионном синтезе является быстрая термическая обработка (БТО) [6].

Диаграмма состояния системы Ni-Si содержит шесть соединений никеля с кремнием [7], но при диффузионном синтезе для случая избытка кремния по мере увеличения температуры термообработки последовательно образуются только три фазы Ni₂Si, NiSi и NiSi₂ [5]. Данные силициды существенно отличаются между собой по величине удельного сопротивления (табл. 1), которая для определенной фазы силицида никеля слабо зависит от способа ее получения, а ее разброс в тонких пленках обусловлен скорее рассеянием носителей заряда на примесных дефектах и границах зерен. Однако прогнозирование сопротивления слоев силицидов никеля на кремнии осложняется тем фактом, что температура формирования той или иной фазы силицида никеля может существенно различаться [5, 7]. Например, низкотемпературная фаза Ni₂Si как для стационарной, так и для быстрой термообработки по данным различных источников, может формироваться в интервале температур от 175 до 300 °С. И в то же время нижний предел температуры формирования следующей силицидной фазы NiSi лежит в диапазоне от 275 до 350 °С.

Таблица 1. Значения удельного сопротивления пленок никеля и его силицидов
Table 1. Values of specific resistance of nickel films and its silicides

Условия получения пленок Conditions for films fabrication					Удельное сопротивление при комнатной температуре, мкОм×см Specific resistance at room temperature, μOhm×cm	Источник Source
Толщина исходной пленки Ni, нм Thickness of initial Ni film, nm	Условия диффузионного синтеза Diffusion synthesis conditions					
	Тип термообработки Thermal treatment type	Температура процесса, °С Process temperature, °C	Время процесса Process time	Фаза силицида Silicide phase		
Не указано				Ni	7–10	[1]
				Ni ₂ Si	24–30	
				NiSi	10,5–18	
				NiSi ₂	34–50	
30	стационарная	400–700	60 мин	NiSi	12	[8]
		750–800	60 мин	NiSi ₂	35	
100	быстрая	500	30 с	NiSi	11	[9]

Высота барьера Шоттки никеля на кремнии *n*-типа ориентации (111) также подвержена существенным вариациям в зависимости от концентрации доноров в кремнии, способа подготовки поверхности, способа и условий формирования барьерного слоя, влияющих как на фазу образующего силицида, так и на его кристаллическую структуру, совершенство границы раздела, и определяющих в конечном итоге высоту барьера Шоттки [10–14]. Так, для пленок никеля высота барьера Шоттки может лежать в пределах от 0,57 до 0,85 В [10–13], для пленок Ni₂Si – в пределах от 0,67 до 0,75 В [5, 10, 12], а для пленок NiSi – в пределах от 0,66 до 0,78 В [5, 10, 12–14].

Таким образом, изменения электрофизических свойств пленок никеля на кремнии в зависимости от способов и условий их термообработки оказываются сложно прогнозируемыми. Настоящая работа посвящена установлению влияния температуры быстрой термообработки пленок никеля на кремнии *n*-типа проводимости на их удельное сопротивление и контактные свойства.

Методика проведения эксперимента

Пленки никеля исходной толщиной порядка 60 нм наносили магнетронным распылением мишени из никеля чистотой 99,96 % в среде аргона чистотой 99,993 % при давлении 0,4 Па на установке SNT «Sigma» с безмасляной откачкой на кремниевые подложки двух типов. Перед нанесением никеля подложки подвергали химической очистке сначала в растворе плавиковой кислоты, а затем в перекисно-аммиачном растворе. Подложки первого типа представляли собой эпитаксиальные слои легированного фосфором кремния с удельным сопротивлением 0,58–0,63 Ом×см и толщиной 5,3–5,8 мкм, сформированные

на подложках монокристаллического кремния 100 КДБ 10 (111). Подложки второго типа представляли собой эпитаксиальные слои с аналогичными параметрами на подложках монокристаллического кремния 100 КЭМ 0,005 (111), содержащие охранные кольца и вскрытые в полевого окисле контакты для формирования структуры диодов Шоттки размером кристалла 1,42×1,42 мм.

Затем подложки обоих типов подвергали быстрой термической обработке в режиме теплового баланса путем облучения обратной стороны подложек некогерентным световым потоком в среде азота в течение 7 с при температуре от 200 до 550 °С. Источником нагрева служили кварцевые галогенные лампы накаливания. Контроль температуры рабочей стороны подложки осуществлялся термопарой с точностью ±0,5 °С.

На подложках первого типа измеряли поверхностное сопротивление с помощью установки RS-30 с погрешностью не более ±5 %. Величину удельного сопротивления ρ (Ом×см) пленок никеля рассчитывали по формуле

$$\rho = R_S \cdot d, \quad (1)$$

где R_S – поверхностное сопротивление образца, Ом/кв., d – толщина пленки никеля на кремнии после термообработки, см.

В свою очередь, толщину пленок никеля определяли с помощью растрового электронного микроскопа (РЭМ) S-4800 ф. Hitachi (Япония) с погрешностью не более ± 5%.

Для подложек второго типа после быстрой термообработки удаляли непрореагировавшие остатки никеля с поверхности полевого окисла в перекисно-соляном растворе, а затем последовательно наносили на рабочую сторону слой титана толщиной 0,11 мкм и сплава алюминий-кремний толщиной 1,4 мкм и при помощи фотолитографии формировали металлизацию анода. Далее обратные стороны подложек подвергали шлифованию до остаточной толщины 300 мкм и выполняли на них металлизацию катода последовательным напылением в вакууме слоев титана, сплава никель-ванадий и серебра. После этого подложку разделяли на отдельные кристаллы, которые собирали в пластмассовый корпус типа ТО-220.

Измерения вольтамперных характеристик (ВАХ) проводились на комплексе прецизионных измерений характеристик элементной базы ИМС В1500 ф. Agilent (США) с зондовой станцией Summit 11000 AP фирмы Cascade. Высоту барьера Шоттки ϕ_B (В) определяли методом ВАХ [10] путем экспоненциальной аппроксимации начального участка прямой ВАХ диода Шоттки к оси ординат с последующими расчетами по формуле:

$$\phi_B = \frac{kT}{q} \ln \left(\frac{SA^{**}T^2}{I_0} \right), \quad (2)$$

где k – постоянная Больцмана, равная $1,38 \times 10^{-23}$ Дж×К⁻¹, T – абсолютная температура, равная 296 К, q – заряд электрона, равный $1,602 \times 10^{-23}$ Кл, S – площадь выпрямляющего контакта, равная $1,38 \times 10^{-2}$ см², A^{**} – эффективная постоянная Ричардсона, равная $120 \text{ А} \times \text{см}^{-2} \times \text{К}^{-2}$, I_0 – ток насыщения (А), определяемый точкой пересечения прямой экспоненциальной аппроксимации начального участка ВАХ с осью ординат.

Результаты и их обсуждение

1 Толщина пленок. Результаты исследований с помощью РЭМ показывают (рис. 1), что БТО при температуре от 200 до 550 °С приводит к росту толщины исходной пленки никеля. Это свидетельствует о наличии твердофазных взаимодействий никеля с кремнием во всем интервале температур термообработки.

Сравнительный анализ отношения толщины пленки никеля после термообработки d к толщине пленки исходного никеля d_0 (рис. 2) с известными значениями для силицидов никеля Ni₂Si ($d/d_0 = 1,47$) и NiSi ($d/d_0 = 2,2$) [1] позволяет сделать вывод, что при температуре БТО порядка 250 °С происходит полный переход никеля в фазу Ni₂Si, а при температуре БТО порядка 350 °С – в фазу NiSi. Таким образом, фазовый переход Ni₂Si – NiSi осуществляется

в диапазоне температур БТО от 250 до 350 °С. В тоже время рост отношения d/d_0 до значений порядка 2,7 с увеличением температуры БТО до 550–550 °С не дает оснований для вывода о формировании фазы NiSi_2 ($d/d_0 = 3,61$) [1].

Полученные температуры формирования фаз Ni_2Si и NiSi хорошо согласуются с результатами других авторов [5, 7], но существенное (более, чем на два порядка величины) уменьшение времени формирования силицидных фаз при БТО свидетельствует об уменьшении энергии активации процесса их образования.

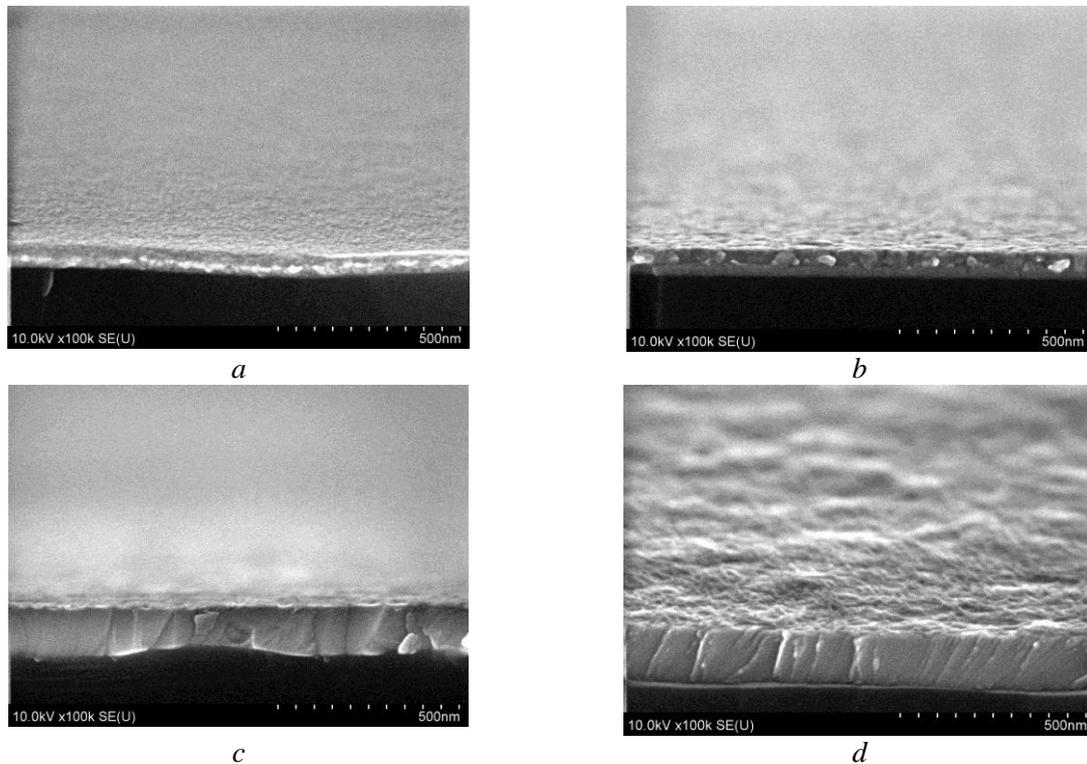


Рис. 1. РЭМ-фото поперечного скола образцов Ni/n-Si(111): *a* – исходная пленка никеля, *b* – пленка никеля после БТО при температуре 200 °С, *c* – пленка никеля после БТО при температуре 350 °С, *d* – пленка никеля после БТО при температуре 550 °С

Fig. 1. Cross-sectional SEM image of Ni/n-Si (111) samples: *a* – initial nickel film, *b* – nickel film after RTP at 200 °С, *c* – nickel film after RTP at 350 °С, *d* – nickel film after RTP at 550 °С

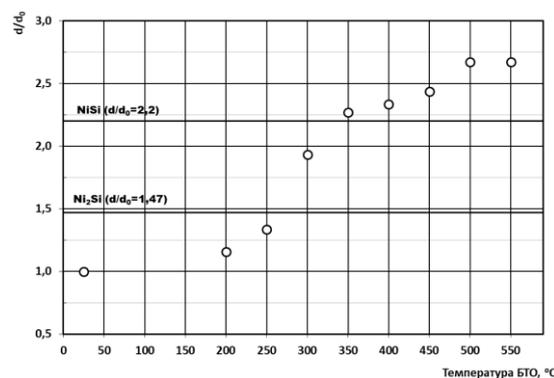


Рис. 2. Зависимость отношения d/d_0 от температуры БТО
Fig. 2. Dependence of d/d_0 ratio on RTP temperature

2 Удельное сопротивление. Удельное сопротивление исходной пленки никеля находится на уровне 15 мкОм×см, (рис. 3) что в 1,5–2,1 раза больше справочных данных [1] и объясняется размерными эффектами в тонких пленках никеля, обусловленными рассеянием носителей заряда на примесных дефектах и границах зерен. Рост удельного сопротивления пленок никеля при температурах БТО 200 и 250 °С до значений 26–30 мкОм×см несомненно является признаком формирования фазы Ni_2Si , что хорошо согласуется со справочными

данными [1]. Причем наименьший разброс удельного сопротивления, наблюдаемый при температуре БТО 250 °С, свидетельствует о структурной однородности пленок и полном переходе никеля в фазу Ni₂Si, что коррелирует с выводом, сделанным при анализе изменения толщины пленки никеля.

При температуре БТО 300 °С наблюдается снижение величины удельного сопротивления до 20–28 мкОм×см, что происходит вследствие начала перехода фазы Ni₂Si в фазу NiSi. В диапазоне температур БТО от 350 до 550 °С величина удельного сопротивления составляет 15–18 мкОм×см, что совпадает со справочными данными для NiSi [1] и подтверждает переход никеля в данную фазу. Минимальное значение удельного сопротивления порядка 15 мкОм×см и самый минимальный его разброс наблюдается при температуре БТО 400 °С, что позволяет сделать вывод о высокой структурной однородности данных пленок. Соответственно, незначительное превышение данной величины до 16–18 мкОм×см при температуре БТО 350 °С вызвано неполным перестроением кристаллической структуры при переходе фазы Ni₂Si в фазу NiSi. При увеличении температуры БТО от 450 до 550 °С также наблюдается увеличение значений удельного сопротивления и их разброса, что, наиболее вероятно, связано с дальнейшей перестройкой кристаллической структуры фазы NiSi. Причем незначительный рост величины удельного сопротивления также не дает оснований для вывода о формировании высокоомной фазы NiSi₂.

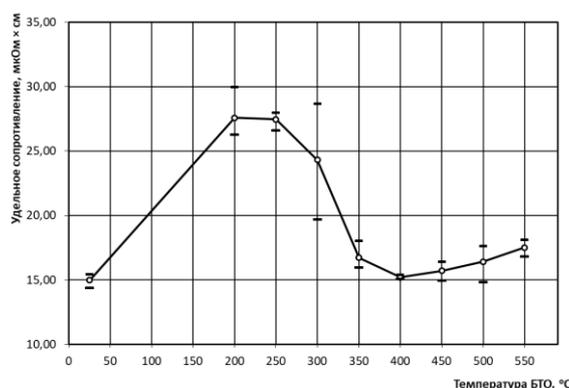


Рис. 3. Зависимость удельного сопротивления пленок никеля на кремнии от температуры БТО
Fig. 3. Dependence of specific resistance of nickel films on silicon on RTP temperature

3 Барьер Шоттки. Высота барьера Шоттки исходных пленок никеля на кремнии составила величину порядка 0,65 В (рис. 4), что оказалось несколько выше значений, представленных в ряде других работ, например, в [10, 12, 13], и сопоставимо с результатами работы [11], что, наиболее вероятно, обусловлено в особенностях подготовки поверхности кремниевых подложек перед нанесением никеля. Выполнение БТО при температуре 200 °С приводит к незначительному росту высоты барьера до величины порядка 0,66 В, что сопоставимо результатами для пленок Ni₂Si, полученными стационарной термообработкой при температуре 250 °С [12].

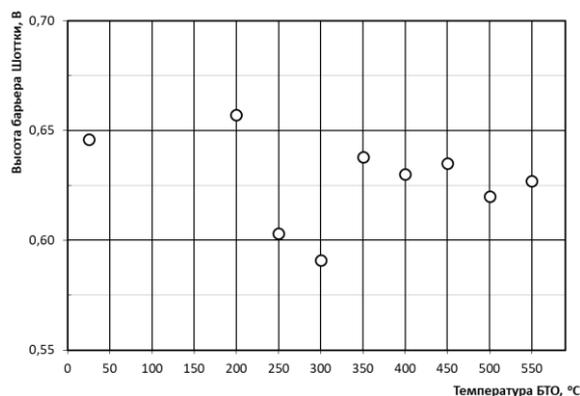


Рис. 4. Зависимость высоты барьера Шоттки структуры Ni/Si от температуры БТО
Fig. 4. Dependence of Ni/Si structure Schottky barrier height on RTP temperature

Для БТО пленок никеля, выполненной при температурах 250 и 300 °С, наблюдается резкое снижение высоты барьера до значений порядка 0,6 и 0,59 В, соответственно. Данная высота барьера не характерна для отдельно взятых фаз силицидов никеля Ni₂Si или NiSi [5, 10, 12–14]. Это позволяет сделать вывод, что при выполнении БТО в данных условиях высота барьера Шоттки определяется не столько фазовым составом переходного слоя силицида на кремнии, сколько наличием дефектов на границе раздела силицид–кремний, генерация которых вызвана структурно – фазовыми превращениями в пленках никеля. Для БТО, выполненной при температуре 350–550 °С, наблюдается увеличение высоты барьера Шоттки до величины 0,62–0,64 В. Данные значения можно считать сопоставимыми с результатами других работ для фазы NiSi, составляющими значения порядка 0,65–0,66 В. Таким образом, и результаты определения высоты барьера подтверждают вывод о переходе пленки никеля в фазу NiSi при температуре БТО 350 °С. Сопоставление полученных результатов исследований позволяет сделать вывод, что в диапазоне температур БТО от 350 до 550 °С формируются равновесные и термостабильные слои моносилицида никеля с низкой дефектностью. При этом наименьшей дефектностью и лучшей воспроизводимостью электрофизических свойств характеризуются пленки силицида никеля, сформированные БТО пленок никеля на кремнии при температуре 400–450 °С.

Заключение

В работе установлены закономерности изменения удельного сопротивления и высоты барьера Шоттки пленок никеля толщиной порядка 60 нм на кремнии *n*-типа (111) при их быстрой термообработке в диапазоне температур от 200 до 550 °С. Показано, что быстрая термообработка структуры Ni/*n*-Si (111) при температурах 200–250 °С в результате фазового перехода Ni-Ni₂Si приводит к увеличению исходной пленки никеля в 1,15–1,33 раза, росту удельного сопротивления до 26–30 мкОм×см и изменению высоты барьера Шоттки от 0,66 до 0,6 В.

При температуре быстрой термообработки 300 °С исходная пленка никеля увеличивается в 1,93 раза, удельное сопротивление и высота барьера Шоттки снижаются до 26–30 мкОм×см и 0,59 В, соответственно, что обусловлено фазовым переходом Ni₂Si-NiSi и фиксацией высоты барьера поверхностными состояниями на границе раздела силицид-кремний. Быстрая термообработка при температуре от 350 до 550 °С приводит к преобразованию исходной пленки никеля в фазу NiSi и сопровождается увеличением ее толщины от 2,26 до 2,67 раз, уменьшением удельного сопротивления до 15–18 мкОм×см и ростом высоты барьера Шоттки до 0,62–0,64 В. Для формирования слоев Ni₂Si и NiSi БТО требуется на два порядка меньше времени, чем при стационарном отжиге, что обусловлено уменьшением энергии активации процесса силицидообразования. В диапазоне температур БТО от 350 до 550 °С формируются равновесные и термостабильные слои моносилицида никеля с низкой дефектностью. При этом наименьшей дефектностью и лучшей воспроизводимостью электрофизических свойств характеризуются пленки силицида никеля, сформированные БТО пленок никеля на кремнии при температуре 400–450 °С. Полученные результаты могут быть использованы в технологии создания изделий интегральной электроники с выпрямляющими контактами.

Список литературы / References

1. Doering R., Nishi Y. Handbook of Semiconductor Manufacturing Technology. 2nd edition. New York: CRC Press; 2008.
2. Karabko A.O., Soloviev Y.A., Kaidov O.L., Gluchmanchuk V.V., Dostanko A.P. [The development of technological processes of the formation of solar cells with contacts based on nickel silicide]. *Doklady BGUIR = Doklady BGUIR*. 2009;4(42):61-64. (In Russ.)
3. Bahabry R.R., Hanna A.N., Kutbee A.T., Gumus A., Hussian M.M. Impact of Nickel Silicide Rear Metallization on the Series Resistance of Crystalline Silicon Solar Cells. *Energy Technol.* DOI: 10.1002/ente.201700790.
4. Popov S. [Power Schottky Diodes]. *Electronic Components*. 2002;8:77-81 (In Russ.)
5. М'jurarka Sh.P. [*Silitsidy dlja SBIS*]. М.: Mir; 1986. (In Russ.)

6. Pilipenko V.A. [*Bystrye termoobrabotki v tehnologii SBIS*]. Minsk: Izd. centr BGU; 2004. (In Russ.)
7. Borisenko V.E., Hesketh P.J. *Rapid Thermal Processing of Semiconductors*. Berlin: Springer; 1997
8. Chen L.J. *Silicide Technology for Integrated Circuits*. London; 2004.
9. Martin D.M., Enlund J., Yanchev V., Olsson J., Katardjiev I. Optimisation of smooth multilayer Nickel Silicide surface for ALN growth. *Journal of Physics: Conference Series*. 2008;100(4):042014. DOI: 10.1088/1742-6596/100/4/042014.
10. Zee S.M. [*Fizika poluprovodnikovyh priborov*]. M.: Mir; 1984. (In Russ.)
11. Purtell R., Hollinger G., Rubloff G.W., Ho P.S. Schottky barrier formation at Pd, Pt, and Ni/Si(111) interfaces. *J. Vac. Sci. Technol. A*. 1983;1(2):566-569. DOI: 10.1116/1.571958.
12. Schmid P.E., Ho P.S., Foll H., Tan T.Y. Effects of variations of silicide characteristics on the Schottky-barrier height of silicide-silicon interfaces. *Physical Review B*. 1983;28(8):4593-4601. DOI: 10.1103/physrevb.28.4593.
13. Tung R.T., Ng K.K., Gibson J.M., Levi A.F.J. Schottky-barrier heights of single-crystal NiSi₂ on Si(111): The effect of surface p-n junction. *Physical Review B*. 1986;33(10):7077-7090. DOI: 10.1103/physrevb.33.7077.
14. Liehr M., Schmid P.E., LeGoues F.K., Ho P.S. Schottky barrier heights of epitaxial Ni-silicides on Si(111). *J. Vac. Sci. Technol. A*. 1986;4(3):855-859. DOI: 10.1116/1.573795.

Вклад авторов

Соловьёв Я.А. изготовил экспериментальные образцы, выполнил анализ и интерпретацию результатов.

Пилипенко В.А. осуществил постановку задачи, выполнил электрофизические измерения.

Authors contribution

Solovjov J.A. made experimental samples, performed analysis and interpretation of the results.

Pilipenko V.A. carried out the statement of the problem, performed electrophysical measurements.

Сведения об авторах

Соловьёв Я.А., к.т.н., доцент, заместитель директора филиала «Транзистор» ОАО «ИНТЕГРАЛ» – управляющей компании холдинга «ИНТЕГРАЛ».

Пилипенко В.А., д.т.н., профессор, член-корреспондент НАН Беларуси, заместитель директора по научному развитию ГЦ «Белмикроанализ» ОАО «ИНТЕГРАЛ» – управляющая компания холдинга «ИНТЕГРАЛ».

Information about the authors

Solovjov Ja.A., PhD, Associate Professor, Deputy Director of “Transistor” Branch of JSC “Integral” holding managing company.

Pilipenko V.A., D.Sci, professor, corresponding member of the National Academy of Sciences of Belarus., deputy director of Science Development of State Center “Belmicroanalysis”, JSC “INTEGRAL” – “INTEGRAL” holding managing company.

Адрес для корреспонденции

220108, Республика Беларусь,
Минск, ул. Корженевского, 16,
Филиал «Транзистор» ОАО «ИНТЕГРАЛ» –
управляющая компания холдинга «ИНТЕГРАЛ»
тел.+375-17-212-21-21;
e-mail: jsolovjov@integral.by
Соловьёв Ярослав Александрович

Address for correspondence

220108, Republic of Belarus,
Minsk, Korzhenevskogo str., 16,
“Transistor” Branch of JSC “INTEGRAL” –
“INTEGRAL” holding managing company
tel. +375-17-212-21-21;
e-mail: jsolovjov@integral.by
Solovjov Jaroslav Aleksandrovich