

для других соединений, в частности, нитридов металлов, перспективных для создания на их основе электронных и оптоэлектронных приборов.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЕ ССЫЛКИ

1. Атомно-эмиссионный многоканальный спектральный анализ: научное и практическое применение / Е. С. Воропай [и др.] // Вестн. Бел. гос. ун-та. – 2009. – Сер. 1, № 1. – С. 14–20.
2. Laser ablation for analytical sampling: what can we learn from modeling? / A. Bogaerts [et al.] // Spectrochimica Acta, Part B : Atomic Spectroscopy. – 2003. – Vol. 58, № 11. – P. 1867–1893.
3. Laser-induced vaporization of a metal surface / M. Aden [et al.] // J. of Physics. D, Appl. Physics. – 1992. – Vol. 25, № 1. – P. 57–65.
4. Сухов, Л. Т. Лазерный спектральный анализ: физические принципы / Л. Т. Сухов ; отв. ред. В. Ф. Шабанов. – Новосибирск : Наука, 1990. – 139 с.
5. Материалы в приборостроении и автоматике : справочник / Ю. М. Пятин [и др.] ; под ред. Ю. М. Пятина. – 2-е изд., перераб. и доп. – М. : Машиностроение, 1982. – 528 с.
6. Чинь, Н. Х. Спектральный контроль и управление процессами образования кластеров нитридов алюминия в плазме при воздействии на алюминий сериями сдвоенных лазерных импульсов / Н. Х. Чинь, А. Р. Фадаиян, А. П. Забогин // Физико-химические аспекты изучения кластеров, наноструктур и наноматериалов : межвуз. сб. науч. тр. / под общей ред. В. М. Самсонова, Н. Ю. Сдобнякова ; Тверской гос. ун-тет. – Тверь, 2011. – Вып. 3. – С. 259–263.

#### ФОРМИРОВАНИЕ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ ПРИБОРОВ С ДИОДАМИ ШОТТКИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ БЫСТРОЙ ТЕРМООБРАБОТКИ

**Я. А. Соловьёв, В. А. Солодуха, В. А. Пилипенко,  
Д. В. Жигулин, Е. С. Ацецкая, О. Э. Сарычев**

---

*ОАО «ИНТЕГРАЛ» – управляющая компания холдинга «ИНТЕГРАЛ»,  
ул. Казинца И.П., 121А, Минск, Беларусь,  
e-mail: jsolovjov@integral.by*

При быстрой термообработке пленок никеля, платины и сплава никель-платина-ванадий некогерентным световым потоком в режиме теплового баланса в диапазоне температур от 400 до 550 °С получены барьеры Шоттки высотой 0,63, 0,71 и 0,82 В. Это обеспечивает работоспособность диодов Шоттки при верхней границе диапазона температур окружающей среды от +125 до +175 °С.

**Ключевые слова:** диод Шоттки; силицид никеля; силицид платины; быстрая термообработка.

#### FORMATION OF SEMICONDUCTOR DEVICES WITH SCHOTTKY DIODES USING RAPID THERMAL TREATMENT

**Ja. A. Solovjov, V. A. Solodukha, V. A. Pilipenko,  
D. V. Zhygulin, E. S. Atsetsckaya, O. E. Sarychev**

---

*JSC "INTEGRAL" – Holding Management Company 121 A, Kazintsya I.P. Str.,  
Minsk, 220108, Belarus  
Corresponding author: Ja. A. Solovjov (jsolovjov@integral.by)*

Schottky barriers with height of 0.63 V, 0.71 V and 0.82 V were obtained by rapid thermal treatment of nickel, platinum and nickel-platinum-vanadium alloy films on silicon with non-coherent light flux in thermal balance mode at temperature range from 400 °C to 550 °C. This ensures the operability of Schottky diodes at the upper limit of the ambient temperature range from +125 °C to +175 °C.

**Key words:** Schottky diode; nickel silicide; platinum silicide; rapid thermal treatment.

## ВВЕДЕНИЕ

Современные микроэлектронные устройства должны сочетать высокую надежность и низкое потребление энергии. Проблемы снижения потерь электрической энергии при ее преобразовании решаются в рамках соответствующего направления электронной техники – силовой электроники, которая, в свою очередь, опирается на собственную электронную компонентную базу (ЭКБ), включающую как различные классы силовых полупроводниковых приборов, так и интегральных схем [1]. Практически идеальным элементом ЭКБ силовой электроники являются диоды Шоттки, отличающиеся от традиционных выпрямительных диодов с *p-n*-переходом меньшим падением напряжения при прямых смещениях, высоким быстродействием, обусловленным отсутствием неосновных носителей, и радиационной стойкостью. К недостаткам диодов Шоттки относят высокие уровни обратных токов, значения которых сильно зависят от высоты барьера и температуры перехода металл-полупроводник [2]. Конкретную величину барьера Шоттки выбирают исходя из условия минимальных потерь мощности в заданных условиях эксплуатации, включающих температуру окружающей среды и характер рабочего цикла диода Шоттки, характеризуемый максимальными прямым током и обратным напряжением, длительностью прямого и обратного смещений, а также частотой переключения между данными состояниями [3].

Широкое применение в качестве материала барьеров Шоттки в изделиях силовой электроники, характерной особенностью которых является формирование протяженных границ силицид – кремний с низкой дефектностью и микрошероховатостью, получили силициды переходных металлов [4]. Наилучшим способом формирования протяженных слоев силицидов является их диффузионный синтез путем термообработки тонких пленок металлов, нанесенных на поверхность кремния, поскольку в таком случае формируется атомарно чистая граница силицид – кремний с минимальными колебаниями контактных свойств [5]. С другой стороны, наилучшее качество силицидных слоев при диффузионном синтезе обеспечивается путем быстрой термообработки (БТО) благодаря минимальному термическому бюджету и возможности обеспечения исключительной чистоты процесса в реакторе ограниченного объема [6, 7]. Для целей силовой электроники представляют собой интерес переходные слои силицидов с высотой барьера Шоттки на кремнии от 0,6 до 0,85 В, что позволяет обеспечивать температурный диапазон ее эксплуатации от +125 до +175 °C [2]. Формирование диодов в данном диапазоне высоты барьеров Шоттки может обеспечиваться применением силицидов Pt и Ni [8, 9].

Данная работа посвящена установлению закономерностей изменений электрофизических и контактных свойств силицидов Ni, Pt и Ni-Pt-V от условий их формирования диффузионным синтезом БТО.

## МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Пленки Ni, Pt и сплава Ni(77 мас.%)–Pt(18 мас.%)–V(5 мас.%) толщиной 50–80 нм наносили на подложки монокристаллического кремния (ПМК). При анализе удельного сопротивления использовали ПМК марки КЭФ 0,5 (111). Для исследований высоты барьера Шоттки использовали ПМК марки КЭМ 0,005 (111) со сформированным на рабочей стороне эпитаксиальным слоем (5,3–5,8) КЭФ (0,58–0,63), содержащем охранные кольца и вскрытые в полевом окисле контакты для формирования структуры диодов Шоттки размером кристалла 1,42×1,42 мм. Затем подложки обоих типов подвергали БТО в режиме теплового баланса путем облучения нерабочей стороны подложек некогерентным световым потоком в среде азота в течение 7 с. Источником нагрева служили кварцевые галогенные лампы накаливания. Температуру БТО образцов для исследований удельного сопротивления варьировали в интервале от 200 до 550°C, а образцов для исследований высоты барьера - в интервале от 400 до 550°C.

На подложках со структурами диодов Шоттки после БТО удаляли непрореагировавшие остатки металлов, а затем на рабочую сторону последовательно наносили слои Ti толщиной 0,11 мкм, сплава АК1 толщиной 1,4 мкм и при помощи фотолитографии формировали металлизацию анода. Затем подложки шлифовали с обратной стороны до остаточной толщины 300 мкм и на шлифованную поверхность наносили металлизацию катода Ti/Ni-V/Ag. После этого подложку разделяли на отдельные кристаллы диодов Шоттки, которые собирали в пластмассовый корпус типа ТО-220.

Поверхностное сопротивление исходных пленок и их силицидов  $R_S$  измеряли четырехзондовым методом на установке RS-30 (ф. KLA Tencor, США). Толщину пленок металлов до и после термообработки определяли с помощью растрового электронного микроскопа S4800 (ф. Hitachi, Япония). Удельное сопротивление рассчитывали по формуле:

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

где  $R_S$  – поверхностное сопротивление металлической пленки [Ом/□],  $d$  – толщина пленки [см].

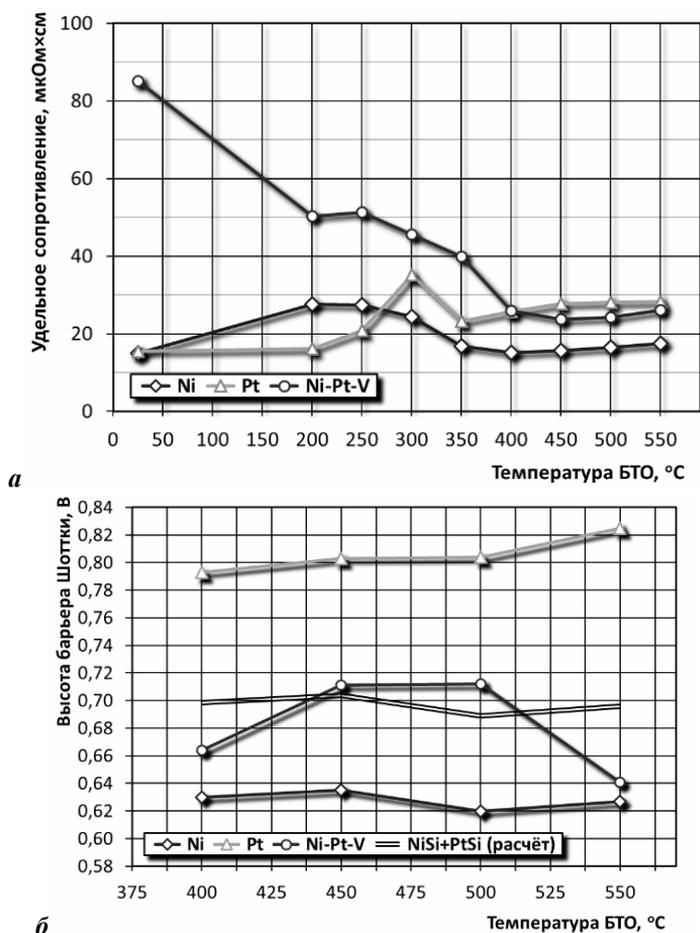
Измерения вольтамперных характеристик (ВАХ) проводились на комплексе прецизионных измерений характеристик элементной базы ИМС В1500 (ф. Agilent, США). Высоту барьера Шоттки определяли методом ВАХ [9]. Высоту барьера из силицидов сплава Ni–Pt–V ( $\varphi_{NiPt}$ , В) рассчитывали в приближении параллельных контактов NiSi/Si и PtSi/Si исходя из того, что V не участвует в реакциях с кремнием до температур ниже 600°C, согласно формуле [10]:

$$\varphi_{NiPt} = -\frac{kT}{q} \ln \left\{ C_{Ni} \left[ \exp\left(\frac{-q\varphi_{Ni}}{kT}\right) - \exp\left(\frac{-q\varphi_{Pt}}{kT}\right) \right] + \exp\left(\frac{-q\varphi_{Pt}}{kT}\right) \right\}, \quad (2)$$

где  $k$  – постоянная Больцмана [Дж×К<sup>-1</sup>],  $T$  – абсолютная температура [К],  $q$  – элементарный заряд [Кл],  $C_{Ni}$  – атомная доля Ni в исходном сплаве без учета V,  $\varphi_{Ni}$  – высота барьера Шоттки NiSi/Si [В];  $\varphi_{Pt}$  – высота барьера Шоттки PtSi/Si [В].

## РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Зависимости удельного сопротивления и высоты барьера Шоттки структур Ni/Si, Pt/Si и Ni-Pt-V/Si представлены на рис. 1, а, б.



**Рисунок – Зависимость свойств структур Ni/Si, Pt/Si, Ni-Pt-V/Si от температуры БТО:**  
**а** – удельное сопротивление; **б** – высота барьера Шоттки

Как видно из рис. 1, *а*, удельное сопротивления структуры Ni/Si при температуре БТО 200–250°C возрастает относительно исходного значения порядка 16 мкОм×см до величины порядка 27 Ом×см, что свидетельствует о формировании фазы силицида Ni<sub>2</sub>Si. При увеличении температуры БТО до 350°C удельное сопротивление постепенно снижается до величины порядка 16 мкОм×см и изменяется незначительно вплоть до температуры БТО 550°C, что обусловлено формированием низкоомной фазы NiSi. Для структуры Pt/Si удельное сопротивление исходной пленки порядка 16 мкОм×см достигает своего максимального значения порядка 35 мкОм×см при температуре БТО 350°C, что обусловлено формированием фазы Pt<sub>2</sub>Si. При дальнейшем увеличении температуры до 400 – 550°C формируется фаза PtSi с удельным сопротивлением порядка 28 мкОм×см. Для структуры Ni-Pt-V/Si исходное удельное сопротивление порядка 85 мкОм×см при температуре БТО 200–250°C уменьшается до уровня порядка 50 мкОм×см. Дальнейшее увеличение температуры БТО до 400–550°C приводит к дальнейшему уменьшению удельного сопротивления до значений порядка 25 мкОм×см. В целом анализ зависимости удельного сопротивления

пленки сплава Ni-Pt-V от температуры БТО позволяет сделать вывод о преимущественном влиянии на его величину фаз силицидов никеля Ni<sub>2</sub>Si при температурах БТО 200–250°C и NiSi при температурах БТО 400–550°C.

Высота барьера Шоттки структуры Ni/Si достигает своего максимального значения порядка 0,63 В при температурах БТО 400 – 450°C, а при дальнейшем увеличении температуры БТО до 500–550°C уменьшается до значений порядка 0,62 В, что обусловлено ростом плотности структурных дефектов на границе NiSi/Si. Для структуры Pt/Si при увеличении температуры БТО от 400 до 550 °С высота барьера Шоттки монотонно возрастает от 0,79 до 0,82 В, что обусловлено снижением плотности дефектов на границе PtSi/Si. Для структуры Ni-Pt-V/Si наблюдается ярко выраженный максимум высоты барьера Шоттки в диапазоне температур БТО 450–500 °С на уровне 0,71 В. В целом характер экспериментальной зависимости высоты барьера Шоттки для силицидов, сформированных БТО сплава Ni-Pt-V на Si, существенно расходится с расчетной зависимостью для параллельных контактов NiSi/Si и Pt/Si, что обусловлено неоднородным распределением Pt по толщине переходного силицидного слоя [11]. Таким образом, локальный максимум высоты барьера на уровне 0,71 В после БТО структуры Ni-Pt-V/Si при температуре 450–500 °С обусловлен преимущественным распределением платины на границе раздела переходного силицидного слоя с кремниевой подложкой.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Установлены зависимости удельного сопротивления и высоты барьера Шоттки структур Ni/Si, Pt/Si и Ni-Pt-V/Si БТО некогерентным световым потоком в режиме теплового баланса. На основе данных структур в диапазоне температур БТО от 400 до 550°C получены барьеры Шоттки высотой 0,63, 0,71 и 0,82 В, что обеспечивает работоспособность диодов Шоттки при верхней границе диапазона температур окружающей среды от +125 до +175°C и делает данную технологию пригодной для формирования полупроводниковых приборов с диодами Шоттки для силовой электроники.

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЕ ССЫЛКИ

1. Белоус, А.И. Основы силовой электроники / А.И. Белоус, В.А. Солодуха, С.А. Ефименко, В.А. Пилипенко. – М.: Техносфера, 2019. – 424 с.
2. Попов, С. Силовые диоды Шоттки. Ч. 1 / С. Попов // Электронные компоненты. – 2002, – № 8. – С. 77–81.
3. Baliga, V.J. Advanced power rectifier concepts / V.J. Baliga. – New York: Springer Science + Business Media, LCC, 2009. – 352 p.
4. Баранов, В.В. Материалы и процессы формирования самосовмещенных пленочных структур изделий твердотельной электроники и микроэлектроники / В.В. Баранов // Доклады БГУИР. – 2004, – №3. – С. 103 – 117.
5. Мьюрарка, Ш.П. Силициды для СБИС / Ш.П. Мьюрарка. – М.: Мир, 1986. – 176 с.
6. Doering, R. Handbook of Semiconductor Manufacturing Technology // R. Doering, Y. Nishi. – New York: CRC Press, 2008. – 1722 p.
7. Пилипенко, В. Быстрые термообработки в технологии СБИС / В. Пилипенко. – Минск: Изд. Центр БГУ, 2004. – 531 с.
8. Зи, С.М. Физика полупроводниковых приборов: В 2-х кн. / С.М. Зи. – М.: Мир, 1984. – Кн. 1 – 455 с.
9. Ohdomari, I Parallel silicide contacts / I. Ohdomari, K.N. Tu // J. Appl. Phys. – 1980, - V. 51, №7. – P. 3735–3739.
10. Формирование барьеров Шоттки на основе никель - платинового силицидного сплава / В. А. Солодуха [и др.] // Микроэлектроника. – 2014. – Т. 43, № 1, - С. 9–16.