

## Токоперенос по металлическим шунтам в омических контактах к $n^+$ -Si

© А.В. Саченко, А.Е. Беляев, В.А. Пилипенко\*, Т.В. Петлицкая\*, В.А. Анищик<sup>†</sup>, Н.С. Болтовец\*, Р.В. Конакова<sup>‡</sup>, Я.Я. Кудрик, А.О. Виноградов, В.Н. Шеремет

Институт физики полупроводников им. В.Е. Лашкарева Национальной академии наук Украины, 03028 Киев, Украина

\* Государственный центр „Белмикроанализ“ Филиала научно-технического центра „Белмикросистемы“ ОАО „ИНТЕГРАЛ“, 220108 Минск, Республика Беларусь

<sup>†</sup> Белорусский государственный университет, 220050 Минск, Республика Беларусь

<sup>‡</sup> Государственное предприятие НИИ „Орион“, 03057 Киев, Украина

(Получена 23 мая 2013 г. Принята к печати 4 июня 2013 г.)

Экспериментально установлено, что в процессе термообработки при  $T = 450^\circ\text{C}$  в течение 10 мин в вакууме  $\sim 10^{-6}$  Торр омический контакт на основе металлизации Au-Pt-Ti-Pd- $n^+$ -Si формируется за счет возникновения в области границы раздела с  $n^+$ -Si наноразмерных металлических шунтов, элементный состав которых состоит из Si, Au и Pt. Высокая плотность шунтов, сопряженных с дислокациями и другими несовершенствами, подтверждается температурной зависимостью удельного контактного сопротивления  $\rho_c(T)$ . Плотность проводящих дислокаций, рассчитанная из температурной зависимости  $\rho_c$ , составляет  $\sim 5 \cdot 10^9 \text{ см}^{-2}$  и коррелирует с плотностью структурных дефектов, определенных по ямкам травления после удаления слоев металлизации.

### 1. Введение

Известно несколько механизмов токопротекания через контакт металл–полупроводник, в том числе через омический контакт к сильно легированным слоям полупроводника, определяющих ход температурной зависимости удельного контактного сопротивления  $\rho_c(T)$  [1–4]. При этом в расчетах не учитывалась плотность структурных дефектов в приконтактной области полупроводника. В то же время существуют экспериментальные данные, указывающие как на возможность генерации структурных дефектов, например дислокаций в приконтактной области кремния [5–7], так и на их участие в токопереносе [8,9]. В последнем случае наблюдается аномальный ход температурной зависимости  $\rho_c$  — рост  $\rho_c$  с увеличением температуры. Авторы [8,9] объяснили его в предположении токопереноса по металлическим шунтам совмещенным с дислокациями с учетом диффузионного ограничения подвода носителей. Однако прямые доказательства наличия таких шунтов в приконтактной области сильно легированного кремния отсутствовали. В данной работе проведено комплексное исследование морфологических особенностей вертикальных срезов (сколов) омических контактов совместно с измерениями температурных зависимостей  $\rho_c$ .

### 2. Образцы и методы их исследования

Омические контакты Au(50 нм)-Pt(50 нм)-Ti(50 нм)-Pd(30 нм)- $n^+$ -Si создавались послойным вакуумным термическим напылением металлов на подогретые до  $300^\circ\text{C}$  подложки Si(111) с удельным сопротивлением

$\sim 0.002 \text{ Ом} \cdot \text{см}$ , легированные мышьяком. Толщина подложек составляла  $\sim 350 \text{ мкм}$ . Исследовались образцы со сплошной металлизацией для измерений элементного состава в латеральной и вертикальной (сколы) плоскостях и с планарной тестовой структурой, представленной в [10] для измерения температурной зависимости  $\rho_c$  методом *transmission line method* (TLM) [11]. Образцы обоих типов исследовались до (исходные) и после термообработки в вакууме  $\sim 10^{-6}$  Торр при  $T = 450^\circ\text{C}$  в течение 10 мин.

На образцах со сплошной металлизацией методом электронной оже-спектроскопии на спектрометре LAS-2000 измерялись профили распределения компонентов в слоях металлизации и на границе раздела (контактообразующий слой)-Si. Элементный состав микровключений в приконтактной области  $n^+$ -Si определялся на энергодисперсном спектрометре QUANTEX 200 с SDD детектором XFlash 5030 (фирма Bruker, Germany). Исследование поверхности сколов образцов с контактной металлизацией проводилось на растровом электронном микроскопе (РЭМ) высокого разрешения S-4800 (фирма Hitachi, Japan).

После химического удаления слоев металлизации поверхность кремния травилась в селективном травителе Райта в течение 90 с при комнатной температуре с целью выявления ямок травления, ассоциируемых со структурными дефектами, в том числе дислокациями.

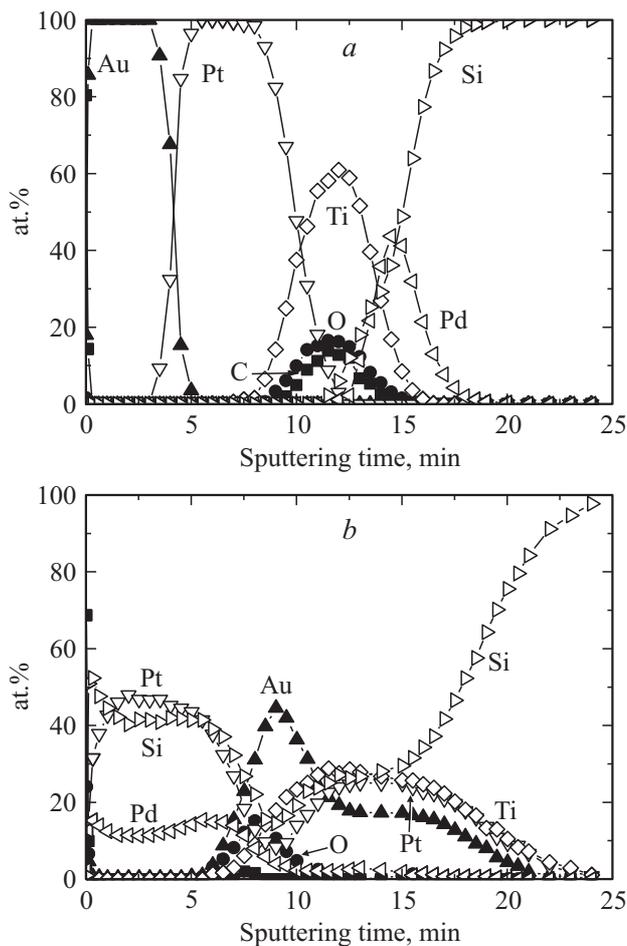
### 3. Экспериментальные результаты и обсуждение

Профили распределения элементного состава контактной металлизации Au-Pt-Ti-Pd- $n^+$ -Si и РЭМ-фото

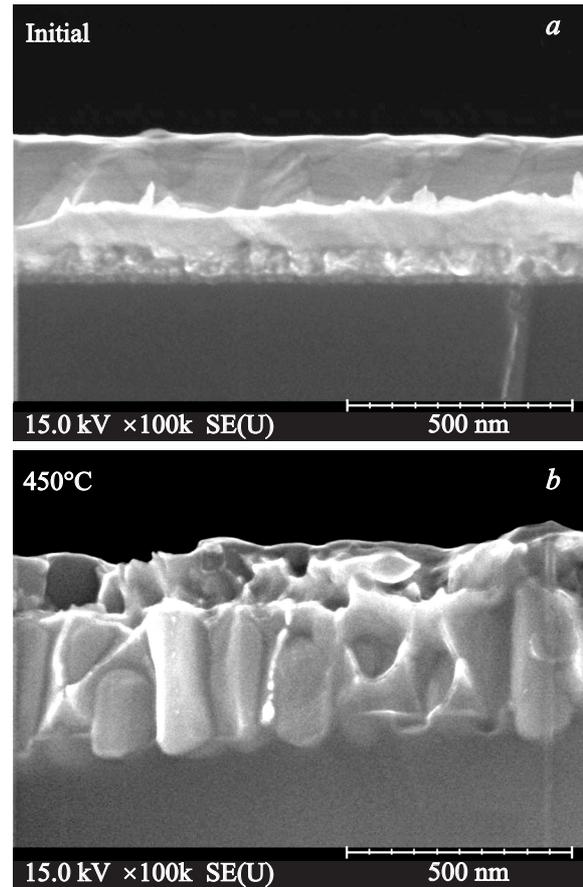
<sup>‡</sup> E-mail: konakova@isp.kiev.ua

вертикальных сколов контактных структур до и после термообработки представлены на рис. 1, *a, b* и 2, *a, b* соответственно. Видно, что исходная контактная металлизация характеризуется слоистой структурой. В пленке титана содержится более 10% кислорода и углерода (рис. 1, *a*).

В процессе термообработки при  $T = 450^\circ\text{C}$  разрушается слоистая структура металлизации (рис. 1, *b*). Атомы Si, Pt и Pd проникают через все слои металлизации на поверхность контакта (в количестве до 50 ат% Si и более 10 ат% Pt и Pd). Внутренняя поверхность приконтактной области со стороны Si содержит значительное количество Ti, Au и Pt. Судя по наличию „полочек“ на профилях компонентов, в слоях металлизации и в области границы раздела с Si могут быть сформированы соответствующие фазы. Данные оже-спектрометрии подтверждаются морфологическими особенностями вертикальных сколов исходного и термообработанного образцов. На рис. 2, *a* представлено РЭМ-фото вертикального скола исходного образца с достаточно резкой границей раздела (контактообразующий слой) — Si. После



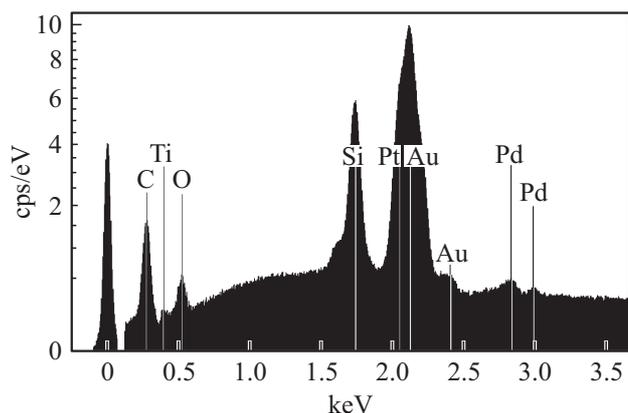
**Рис. 1.** Профили распределения компонентов металлизации в омическом контакте Au-Pt-Ti-Pd- $n^+$ -Si до (*a*) и после термообработки при  $T = 450^\circ\text{C}$  в течение 10 мин в вакууме  $10^{-6}$  Торр (*b*).



**Рис. 2.** РЭМ-фото фрагмента вертикальных сколов омических контактов Au-Pt-Ti-Pd- $n^+$ -Si до (*a*) и после термообработки при  $T = 450^\circ\text{C}$  в течение 10 мин в вакууме  $10^{-6}$  Торр (*b*).

термообработки при  $450^\circ\text{C}$  длительностью 10 мин на РЭМ-фото скола наблюдается сформированная нанометровая столбчатая структура металлизации (рис. 2, *b*). Ее элементный состав представлен на рис. 3. Спектральная характеристика столбчатой структуры получена с пяти столбчатых включений. Как следует из рис. 3, в элементном составе анализируемого столбика наряду с Si присутствуют Pt и Au.

Такую структуру сколов и их химический состав можно понять, если принять во внимание морфологические особенности латеральной поверхности границы раздела (контактообразующий слой) —  $n^+$ -Si и приконтактного слоя Si после удаления металлизации и селективного травления образцов (исходного и прошедшего термообработку при  $T = 450^\circ\text{C}$  в течение 10 мин в вакууме  $\sim 10^{-6}$  Торр). Оказалось, что в исходном образце плотность ямок травления, отождествляемая со структурными дефектами, в нашем случае с дислокациями, составляла  $\sim 10^4 \text{ см}^{-2}$ , тогда как в термообработанном  $\geq 10^9 \text{ см}^{-2}$ . Судя по профилям распределения компонентов в контактной металлизации (рис. 1), плотность дефектов в приконтактной области Si коррелирует с процессами фазообразования в области границы раздела



**Рис. 3.** Элементный состав столбчатых включений контактной металлизации Au-Pt-Ti-Pd- $n^+$ -Si после термообработки при 450°C длительностью 10 мин в вакууме  $10^{-6}$  Торр.

(контактообразующий слой) —  $n^+$ -Si. В исходном образце эти процессы минимальны, тогда как в термообработанном ряд возникших силицидных фаз обуславливает дополнительный источник внутренних механических напряжений (ВМН), релаксация которых приводит к дефектообразованию в приконтактной области кремния. Физическая причина этих ВМН в основном связана с несоответствием параметров решеток и коэффициентов термического расширения силицидных фаз и кремния. При этом в качестве концентраторов напряжений в слоях металлизации могут выступать и чисто металлические фазы. Высокая плотность структурных дефектов в тонкой приконтактной области Si указывает на отсутствие в ней рекристаллизации и структурного упорядочения. Именно по этим дефектам или их скоплениям может проникать металл в кремний и формировать металлические шунты при термообработке еще до возникновения процессов рекристаллизации в сильно легированном приконтактном слое Si, насыщенном высокой ( $\geq 10^9 \text{ см}^{-2}$ ) плотностью структурных дефектов [12].

Согласно предложенной в [13] модели омического контакта с большой плотностью дислокаций в приконтактной области полупроводника, удельное контактное сопротивление,  $\rho_c(T)$ , рассчитывается по формуле

$$\rho_c(T) = \rho_{sh}(T) + \rho_{c0}(T), \quad (1)$$

где

$$\rho_{sh}(T) = \frac{\rho_0(1 + \alpha T)l_D}{\pi r^2 N_{D1}}$$

— сопротивление металлических шунтов, сопряженных с дислокациями;  $\rho_0$  — удельное сопротивление металла (сплава) при  $T = 0^\circ\text{C}$ ;  $\alpha$  — его температурный коэффициент;  $r$  — радиус металлического шунта,  $l_D$  — расстояние, которое электроны проходят по дислокации из объема полупроводника до сплошного омического контакта;  $N_{D1}$  — плотность проводящих дислокаций (пересекающих область пространственного заряда);  $T$  —

температура;

$$\rho_{c0}(T) = \frac{\frac{kT}{q} \left( 1 + \frac{qV_T}{4kT\mu_n} e^{y_{c0}} \int_0^w e^{-y(x)} dx \right)}{\pi L_D^2 N_{D1} \frac{qV_T}{4} n e^{y_{c0}}} \quad (2)$$

— сопротивление с учетом диффузионного подвода электронов к торцам дислокаций,  $k$  — постоянная Больцмана,  $T$  — температура,  $V_T$  — средняя тепловая скорость электронов,  $q$  — элементарный заряд,  $\mu_n$  — подвижность электронов,  $y_{c0}$  — безразмерный равновесный потенциал на границе раздела металл–полупроводник,  $L_D$  — дебаевская длина экранирования,  $n$  — концентрация электронов в полупроводнике, равная концентрации доноров.

Уравнение (2) справедливо, если на границе раздела полупроводник–торец металлического шунта возникает высокая напряженность электрического поля. Это приводит к реализации в области торца шунта потенциальной ямы для электронов из-за большой величины потенциала зеркального изображения, который по знаку противоположен знаку потенциала Шоттки. Ввиду того, что в промежутках между дислокациями формируется истожающий изгиб зон, а его высота велика из-за большой плотности поверхностных состояний в контакте металл–Si, при достаточно высокой плотности дислокаций, сопряженных с металлическими шунтами, протекающий через дислокации ток становится больше, чем ток, протекающий в промежутках между дислокациями. При этом протекающий ток ограничен диффузионным подводом.

Как было установлено в работах [8,9], эти условия выполняются для рассматриваемых нами омических контактов, в которых диаметр шунтов попадает в диапазон нанометровых размеров.

В работе [14] было показано, что, хотя вывод выражения (2) был выполнен для случая невырожденного полупроводника, он справедлив и для вырожденного случая. При этом нужно использовать соответствующие значения для коэффициента диффузии и длины экранирования Дебая с учетом вырождения, а также сделать замену  $n_{c0} = n e^{y_{c0}}$  на  $n_{c0} = f_{c0} n$ . Безразмерный коэффициент  $f_{c0} \gg 1$  равен отношению равновесной концентрации электронов в плоскости контакта к объемной концентрации электронов.

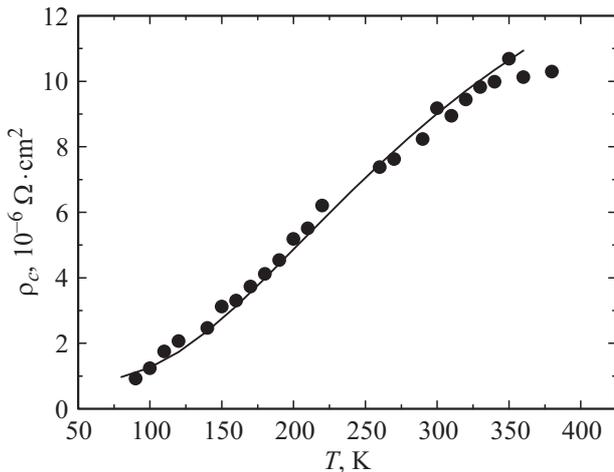
Если полупроводник вырожден, то связь между коэффициентом диффузии  $D_n$  и подвижностью электронов  $\mu_n$  определяется соотношением

$$D_n = \frac{kT}{q} \mu_n \left( \frac{d(\ln n)}{dz} \right)^{-1}, \quad (3)$$

где  $z = E_f/kT$  — безразмерная энергия Ферми,

$$n = \frac{2}{\sqrt{\pi}} N_c \left( \frac{T}{300} \right)^{1.5} \int_0^\infty \frac{\sqrt{x}}{1 + \exp(x - z)} dx, \quad (4)$$

$N_c$  — эффективная плотность состояний в зоне проводимости при  $T = 300 \text{ K}$ .



**Рис. 4.** Температурная зависимость  $\rho_c$  омического контакта Au-Pt-Ti-Pd- $n^+$ -Si, сформированного в процессе термообработки при  $T = 450^\circ\text{C}$  в течение 10 мин в вакууме  $10^{-6}$  Торр: точки — эксперимент, линия — расчет.

Длина экранирования Дебая в случае вырождения полупроводника определяется выражением [15]

$$L_D = \left( \frac{\varepsilon_0 \varepsilon_s k T}{2q^2 N_c} \right)^{0.5} (F'_{1/2}(z))^{-1/2}, \quad (5)$$

где  $\varepsilon_0$  — диэлектрическая проницаемость вакуума,  $\varepsilon_s$  — диэлектрическая проницаемость полупроводника,

$$F'_{1/2}(z) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^\infty \frac{\sqrt{x} \exp(x-z)}{(1 + \exp(x-z))^2} dx. \quad (6)$$

Здесь  $F'_{1/2}(z)$  — производная функции Ферми порядка  $\frac{1}{2}$  от безразмерной энергии Ферми  $z$ .

С учетом изложенного выше для расчета величины  $\rho_c$  в случае диффузионного ограничения можно использовать выражения (1), (2) и при вырождении полупроводника.

На рис. 4 приведены экспериментальная и расчетная зависимости  $\rho_c(T)$  для  $n^+$ -Si при уровне легирования  $3 \cdot 10^{19} \text{ см}^{-3}$ . Из рисунка видно хорошее соответствие между экспериментальными и теоретическими кривыми, если плотность проводящих дислокаций  $N_{D1} \approx 5 \cdot 10^9 \text{ см}^{-2}$ . Полученная величина  $N_{D1}$  коррелирует с экспериментально наблюдаемой по ямкам травления плотностью структурных дефектов в приконтактном слое  $n^+$ -Si после удаления металлизации со сформированного в процессе термообработки омического контакта при  $T = 450^\circ\text{C}$  в течение 10 мин. Растущие с увеличением температуры теоретическая и экспериментальная зависимости  $\rho_c(T)$  указывают на преобладание проводимости по металлическим шунтам, сопряженным с дислокациями в исследуемых в данной работе омических контактах.

## 4. Заключение

Таким образом, сравнительный анализ сколов контактной металлизации Au-Pt-Ti-Pd- $n^+$ -Si до и после термообработки при  $T = 450^\circ\text{C}$  в течение 10 мин в вакууме  $\sim 10^{-6}$  Торр, показал, что в исходных образцах, представляющих собой слоистые металлические структуры, напыленные на подогретые до  $300^\circ\text{C}$  подложки  $n^+$ -Si, наблюдается сплошная достаточно резкая граница раздела металл- $n^+$ -Si. В образцах со сформировавшимися в процессе термообработки омическими контактами в области границы раздела контактообразующий слой- $n^+$ -Si формируется столбчатая структура, состоящая из отдельных локализованных наноразмерных металлизированных включений, представляющих собой шунты, элементный состав которых состоит в основном из Si, Au и Pt. Удельное контактное сопротивление  $\rho_c(T)$  в этом случае растет с повышением температуры от 77 до 400 К. Показано, что такой ход температурной зависимости  $\rho_c$  может быть связан только с проводимостью по металлическим шунтам. Полученные особенности  $\rho_c(T)$  необходимо учитывать в технологии дискретных кремниевых приборов и СБИС.

Работа выполнена при поддержке проекта № 54.1/012 Фонда фундаментальных исследований ДФФД-БРФФД-2013.

## Список литературы

- [1] S.M. Sze, K.Ng Kwok. *Physics of Semiconductor Devices*. 3rd ed. (John Wiley and Sons, 2007) chap. 3, p. 134–196
- [2] Т.В. Бланк, Ю.А. Гольдберг. ФТП, **41** (11), 1281 (2007).
- [3] E.H. Roderick, R.H. Williams. *Metal-Semiconductor Contacts* (Clarendon Press, Oxford, 1988) chap. 3, p. 89.
- [4] В.И. Стриха. *Теоретические основы работы контакта металл-полупроводник* (Киев, Наук. думка, 1974).
- [5] Л.Д. Буйко, В.П. Лесникова, В.А. Пилипенко, В.В. Рожков. *Электрон. техн. Сер. 6. Материалы*, **2**, 16 (1984).
- [6] В.А. Пилипенко. *Быстрые термообработки в технологии СБИС* (Минск, Изд. центр БГУ, 2004) гл. 8, с. 352.
- [7] Ю.Л. Красулин. *Взаимодействие металла с полупроводником в твердой фазе* (М., Наука, 1971).
- [8] А.Е. Беляев, Н.С. Болтовец, Р.В. Коначова, Я.Я. Кудрык, А.В. Саченко, В.Н. Шеремет. SPQEO, **13** (4), 436 (2010).
- [9] А.В. Саченко, А.Е. Беляев, Н.С. Болтовец, Р.В. Коначова, Я.Я. Кудрык, С.В. Новитский, В.Н. Шеремет, J. Li, S.A. Vitusevich. *J. Appl. Phys.*, **111** (8), 083 701 (2012).
- [10] А.В. Саченко, А.Е. Беляев, Н.С. Болтовец, А.О. Виноградов, Л.М. Капитанчук, Р.В. Коначова, В.П. Костылев, Я.Я. Кудрык, В.П. Кладько, В.Н. Шеремет, ФТП, **47** (3), 426 (2013).
- [11] D.K. Schroder. *Semiconductor materials and devices characterization* (N.Y., Wiley, 2006) chap. 3, p. 146.
- [12] Т.В. Бланк, Ю.А. Гольдберг, Е.А. Поссе. ФТП, **43** (9), 1204 (2009).
- [13] А.В. Саченко. В кн.: *Физические методы диагностики в микро- и нанoeлектронике*, под общ. ред. чл.-корр. НАНУ д.ф.м.н., проф. А.Е. Беляева и д.т.н., проф. Р.В. Коначовой (Харьков, ИСМА, 2011) гл. 5, с. 282.

- [14] А.Е. Беляев, Н.С. Болтовец, Р.В. Конакова, Я.Я. Кудрик, А.В. Саченко, В.Н. Шеремет, А.О. Виноградов. ФТП, **46** (3), 344 (2012).
- [15] В.Л. Бонч-Бруевич, С.Г. Калашников. *Физика полупроводников* (М., Наука, 1990).

Редактор Т.А. Полянская

## Current flow via metal shunts in ohmic contacts to $n^+$ -Si

A.V. Sachenko, A.E. Belyaev, V.A. Pilipenko\*,  
T.V. Petlitskaya\*, V.A. Anischik<sup>+</sup>, N.S. Boltovets<sup>•</sup>,  
R.V. Konakova, Ya.Ya. Kudryk, A.O. Vinogradov,  
V.N. Sheremet

Lashkaryov Institute of Semiconductor Physics,  
National Academy of Sciences of Ukraine,  
03028 Kyiv, Ukraine

\* State Center „Belmicroanalysis“,  
Branch of the Scientific-Technical Center  
„Belmicrosystems“ of the Public Corporation  
„INTEGRAL“,  
220108 Minsk, Republic of Belarus

<sup>+</sup> Belarusian State University,  
20050 Minsk, Belarus

<sup>•</sup> State Enterprise Research Institute „Orion“,  
03057 Kyiv, Ukraine

**Abstract** It was found experimentally that in the course of thermal annealing at a temperature  $T = 450^\circ\text{C}$  for 10 min in a vacuum (pressure of  $\sim 10^{-4}$  Pa), an Au-Pt-Ti-Pd- $n^+$ -Si ohmic contact was formed owing to appearance of nanosized metal shunts near the metallization  $n^+$ -Si interface. Their elemental composition involved Si, Au and Pt. High concentration of shunts associated with dislocations (the so-called conducting dislocations) and other imperfections is confirmed by temperature dependence of contact resistivity  $\rho_c(T)$ . The density of conducting dislocations calculated from  $\rho_c(T)$  was  $\sim 5 \cdot 10^9 \text{ cm}^{-2}$ . This correlates with the density of structural defects determined from etch pits after removal of metallization layers.