ОСОБЕННОСТИ ТЕМПЕРАТУРНОЙ ЗАВИСИМОСТИ УДЕЛЬНОГО КОНТАКТНОГО СОПРОТИВЛЕНИЯ ОМИЧЕСКИХ КОНТАКТОВ К n^+-n СТРУКТУРАМ КРЕМНИЯ

А.Е. Беляев[1)], Н.С. Болтовец[2)], А.В. Саченко [1)], П.Н. Романец[1)], Р.В. Конакова[1)], Я.Я. Кудрик[1)], Т.В. Коростинская[2)], А.О. Виноградов[1)], В.С. Слепокуров[1)], А.Б. Атаубаева[1)], В.А. Пилипенко[3)], Т.В. Петлицкая[3)], В.А. Солодуха[4)], А.А. Ходин[5)]

[1)]*Институт физики полупроводников им. В.Е. Лашкарева НАН Украины, пр. Науки 41, Киев, 03028, Украина, konakova@isp.kiev.ua*

[2)]*Государственное предприятие НИИ «Орион», ул. Эжена Потье 8а, Киев, 03057, Украина, bms@i.kiev.ua*

[3)]*Государственный центр «Белмикроанализ» ФНТЦ «Белмикросистемы» ОАО «Интеграл», ул. Корженевского 12, Минск, 220108, Беларусь*

[4)]*ОАО «Интеграл», ул. Казинца И.П., 121А, Минск, 220108, Республика Беларусь*

[5)]*Институт физики им. Б.И. Степанова НАН Беларуси, пр. Независимости 68, Минск, 220072, Беларусь*

В диапазоне температур 120-380 К в вертикальной геометрии измерены температурные зависимости удельного контактного сопротивления $\rho_c(T)$ омических контактов *Au–Ti–Pd₂Si –n⁺–n-Si* со ступенькой легирования, изготовленной диффузией или ионным легированием. Установлено, что в образцах обоих типов ρ_c во всем измеренном интервале температур растет по закону, близкому к квадратичному. Экспериментальные зависимости $\rho_c(T)$ описаны теоретически в предположении, что между сильнолегированным n^+– слоем и подложкой существует тонкий высокоомный слой *Si.*

Введение

Современные научные представления об омических контактах базируются на теории контакта металл-полупроводник, предложенной Шоттки и Бардиным, развитой в работах Зи, Родерика, Стрихи. В случае полупроводника *n*-типа рассматривается низкобарьерный контакт Шоттки с работой выхода электронов из металла меньшей, чем работа выхода электронов из полупроводника, а вольтамперная характеристика (ВАХ) такого контакта линейная и симметричная. При этом удельное контактное сопротивление ρ_c уменьшается с ростом температуры для термоэлектронного и термополевого механизмов токопереноса в контакте и не зависит от температуры для туннельного.

Однако в последние годы появились экспериментальные работы по исследованию омических контактов, в которых наблюдается увеличение ρ_c с ростом температуры, не описываемое известными теоретическими моделями.

Авторами данной работы была предложена и экспериментально подтверждена модель формирования омического контакта, объясняющая рост ρ_c с увеличением температуры в омических контактах к монокристаллическому n^+-Si с уровнем легирования кремния ~10^{19} см$^{-3}$ путем прохождения тока через металлические шунты, совмещенные с дислокациями, у торцов которых (шунтов) возникает обогащающий изгиб зон. В этом случае реализуется принципиально небарьерный механизм токопереноса [1]. Природа дислокаций, возникающих в приконтактной области, чаще всего связывается с релаксацией механических напряжений в контакте. Например, как это было показано в сплавных контактах в работах Гольдберга с соавторами [2], или в омических контактах к тринитридным гетероструктурам, выращенным на чужеродных подложках [3]. Плотность ростовых дислокаций в таких гетероструктурах составляет 10^7 - 10^{11} см$^{-2}$ для разных типов гетероструктур. Плотность дислокаций в сплавных контактах к *Si* и соединениям A^3B^5 ~10^8 см$^{-2}$.

Как известно, в современных полупроводниковых приборах омический контакт создается к специально подлегированному n^+ -слою (или p^+ -слою), к так называемой ступеньке легирования. Генерация структурных дефектов в этом слое в зависимости от уровня легирования и их роль в формировании и свойствах омических контактов до последнего времени подробно не изучалась. В то же время знание зависимости $\rho_c(T)$ для приборов, рабочие температуры которых превышают 300 К, является необходимым. Это связанно с тем, что увеличение ρ_c приводит к ухудшению их параметров, например, снижает эффективность и добротность СВЧ диодов [4]. Поэтому как экспериментальное, так и теоретическое исследование зависимости $\rho_c(T)$ в омических контактах с высокой степенью вырождения в n^+ слое и спецификой структурных дефектов в приконтактном слое представляется актуальным. Поскольку электрофизические, структурные и механические свойства кремния хорошо изучены, и он до сих пор является основным полупроводниковым материалом электронной промышленности, то именно омические контакты со ступенькой легирования в кремнии выбраны нами в качестве модельных для исследования особенностей температурной зависимости ρ_c.

Эксперимент и модельные представления

Удельное контактное сопротивление омических контактов *Au*(150 нм)–*Ti*(60 нм)–*Pd*(20 нм)–n^+–*n-Si* измерялось в вертикальной геометрии на тестовых структурах в диапазоне температур 120-380 К. Ступенька легирования создавалась диф-

фузией или имплантацией фосфора на глубину ~ 0.06-0.07 мкм с поверхностной концентрацией ~10^{20} см$^{-3}$. Диффузия проводилась при T=900 °C в течение 6 минут. Имплантация осуществлялась на установке «Везувий-5», доза 10^3 мкК/см^2, энергия 60 кэВ, послеимплантационный отжиг – при T=850 °C, 30 минут.

В качестве исходного материала использованы пластины монокристаллического бездислокационного кремния КЭФ(100) с ρ~7.5 Ом·см, толщиной ~400 мкм. Контактная металлизация создавалась вакуумным напылением металлов в одном технологическом цикле на подогретую до 350 °C подложку. Омический контакт на основе Pd_2Si формировался непосредственно в процессе напыления, без дополнительного отжига [5].

Температурные зависимости ρ_c, измеренные на образцах с диффузионной и имплантационной ступеньками легирования, приведены на рис. 1. Видно, что для обоих образцов наблюдается растущая с увеличением температуры измерений величина ρ_c.

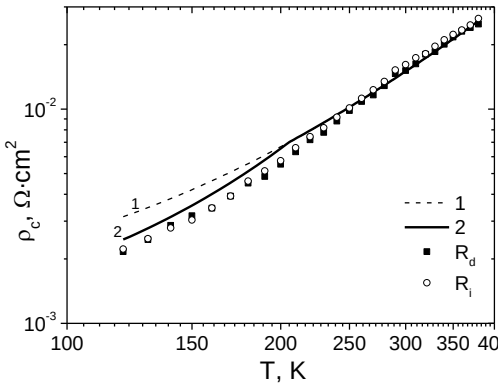

Рис. 1. Экспериментальные (точки) и расчетные (кривые) зависимости удельного контактного сопротивления омических контактов *Au–Ti–Pd₂Si –n⁺–n-Si* со ступенькой легирования, изготовленной диффузией (R_d) или ионным легированием (R_i).

Для объяснения такой зависимости $\rho_c(T)$ нами был произведен аналитический расчет зависимости удельного контактного сопротивления $\rho_c(T)$ для омических контактов со ступенькой легирования на основе Si для предельного случая, когда в узком приконтактном слое полупроводник сильно вырожден, а также имеет место сильно выраженная немонотонность зависимости электрохимического потенциала $\varphi(x)$ от координаты x, направленной вглубь полупроводника. В этом случае удельное контактное сопротивление ρ_c может быть представлено суммой

$$\rho_c = \rho_{c1} + \rho_{c2}, \qquad (1)$$

где ρ_{c1} - удельное контактное сопротивление, связанное с прохождением электронов через барьер на границе сильно легированного полупроводника и металла, а

$$\rho_{c2} = \frac{kN_c}{qA^*Tn_2}\left(1 + \frac{L_D A^* T}{k\mu_n N_c}\right) \qquad (2)$$

- эффективное удельное контактное сопротивление слабо легированной области. Здесь q - заряд электрона, k - постоянная Больцмана, A^* - эффективная постоянная Ричардсона, μ_n - подвижность электронов в слабо легированной области, N_c – плотность состояний в зоне проводимости, T – температура, $L_D = (\varepsilon_0 \varepsilon_s kT / 2q^2 n_2)^{0.5}$ - дебаевская длина экранирования для слабо легированной области, n_2 – концентрация электронов в слабо легированной области, ε_0 и ε_s – диэлектрические константы в вакууме и полупроводнике соответственно.

Выражение (2) получено с учетом результатов работ [6] и [7], т.е. в нем учтены диффузионные и эмиссионные слагаемые в токе, протекающем через слабо легированную область *Si*. Если выполнено неравенство $\rho_{c2} > \rho_{c1}$, контакт будет чисто омическим, а зависимости удельного контактного сопротивления от температуры – растущими. В этом случае в слабо легированной области изгиб зон не истощающий, а обогащающий, и поэтому все напряжение, приложенное к контакту, будет падать на нейтральном объеме, что и обеспечит омичность контакта.

Величина подвижности электронов μ_n в области слабого легирования рассчитывалась с учетом рассеяния на заряженных примесях, а также междолинных и акустических фононах [8].

Анализ полученных результатов

Остановимся далее на рассмотрении температурной зависимости сопротивления ρ_{c2}. Как показывает анализ, величина удельного контактного сопротивления зависит от температуры степенным образом, т.е., $\rho_{c2}(T) \sim T^n$. В зависимости от значения концентрации электронов в слабо легированной области величина n изменяется в широких пределах (от 2 при n_2 ~10^{13} см$^{-3}$ до 0.5 при $n_2 \geq 10^{17}$ см$^{-3}$).

Как видно из рисунка, экспериментальные зависимости $\rho_c(T)$ для обоих случаев почти совпадают. Теоретическая кривая 1 была получена с использованием формулы (2) при n_2 =2.1·10^{13} см$^{-3}$. Отметим, что согласие между теорией и экспериментом достаточно хорошее. Оно может быть еще улучшено, если учесть, что при низких температурах наилучшее согласие теории и эксперимента наблюдается, если положить величину n_2 равной 2.6·10^{13} см$^{-3}$. Комбинируя приведенные выше значения n_2, получаем теоретическую кривую 2.

Главный вопрос заключается в том, что необходимо объяснить резкое уменьшение концентрации электронов (практически на два порядка по сравнению с концентрацией электронов в под-

ложке). Предлагаемое объяснение заключается в учете того, что вследствие релаксации механических напряжений на границе сильно легированных слоев и подложки возникают протяженные дефекты с достаточно высокими значениями концентрации глубоких уровней акцепторной природы. По этой причине между сильно легированными слоями и подложкой возникает тонкий сильно компенсированный слой с концентрацией порядка 10^{13} см$^{-3}$. Это объяснение не противоречит данным, изложенным в монографиях [9, 10].

Заключение

Показано, что в омических контактах со ступенькой легирования n^+–*n-Si*, полученной диффузией или имплантацией фосфора в *n-Si* с ρ~7,5 Ом·см наблюдается растущая с увеличением температуры измерений величина ρ_c. Это связано с реализацией обогащающего изгиба зон в слабо легированной области на границе раздела между n^+ слоем и *n-Si* подложкой, а также в предположении наличия в приконтактной *n* – области тонкого высокоомного слоя *Si*.

Список литературы

1. *Саченко А.В., Беляев А.Е., Пилипенко В.А. и др.* // ФТП. 2014. Т. 48. №4. С. 509-513.
2. *Бланк Т.В., Гольдберг Ю.А., Поссе Е.А.* // ФТП. 2009. Т.43. №9. С. 1204-1209.
3. *Quay R.* Gallium Nitride Electronics. Berlin: Springer Verlag. 2008. 581 p.
4. *Давыдова Н.С., Данюшевский Ю.З.* Диодные генераторы и усилители СВЧ. М.: Радио и связь, 1986. 184 с.
5. Пат. 91936 Україна. МПК H01 L 21/268. Спосіб виготовлення омічного контакту до n-Si. Бєляєв О.Є., Піліпенка В.А., Пятліцкая Т.В. та ін. Заявл. 03.022014; опубл. 25.07.2014. Бюл. №14.
6. *Kupka R.K., Anderson W.A.* // JAP. 1991. V. 96. № 6. P. 3623-3631.
7. *Brezeanu G., Gabuz C., Dascalu D. et al.* // SSE. 1987. V. 30. № 5. P.527-532.
8. *Ferry D.K.* // Phys. Rev. B. 1976. V.14. № 4. P. 1605-1614.
9. *Красников Г.Я., Зайцев Н.А.* Система кремний – диоксид кремния. М.:Техносфера, 2003. 384 с.
10. *Пилипенко В.А.* Быстрые термообработки в технологии СБИС. Минск: Издательский центр БГУ. 2004. 531 с.

THE FEATURES OF TEMPERATURE DEPENDENCE OF CONTACT RESISTIVITY FOR OHMIC CONTACTS TO n^+-n SILICON STRUCTURES

A.E. Belyaev[1)], N.S. Boltovets[2)], A.V. Sachenko[1)], P.N. Romanets[1)], R.V. Konakova[1)], Ya.Ya. Kudryk[1)], T.V. Korostinskaya[2)], A.O. Vinogradov[1)], V.S. Slipokurov[1)], A.B. Ataubaeva[1)], V.A. Pilipenko[3)], T.V. Petlitskaya[3)], V.A. Solodukha[4)], A.A. Hodin[5)]

[1)]*V. Lashkaryov Institute of Semiconductor Physics, NAS of Ukraine, prosp. Nauky, Kyiv, 03028, Ukraine, konakova@isp.kiev.ua*

[2)]*State Enterprise Research Institute "Orion", 8a Eugene Pottier St., Kyiv, 03057, Ukraine*

[3)]*State centre "Belmicroanaliz", subsidiary of R&D Centre "Belmicrosystems", Open Joint Stock Company 12 Korzhenevskiy, Minsk, 220108, Belarus*

[4)]*Public Corporation "Integral", 121A, Kazintsa I.P. Str., Minsk, 220108, Belarus*

[5)]*B.Stepanov Institute of Physics. NASB, 220072, pr. Nezalezhnosty 68, Minsk, Belarus*

The temperature dependences of contact resistivity, $\rho_c(T)$, are measured in the vertical geometry in the 120-380 K range for Au–Ti–Pd_2Si–n^+-n-Si ohmic contacts with a doping step made by diffusion or ion doping. For samples of both types, it is found that ρ_c increases according to the near-quadratic law over the whole measurement temperature range. The experimental $\rho_c(T)$ curves are explained theoretically on the assumption that there is a thin highly resistant Si layer between the heavily doped n^+-layer and the *n*-Si substrate.