

УДК 621.383.5

ИБРАГИМОВ Гусейн Бехбуд оглы, доктор физико-математических наук, профессор, заведующий лабораторией «Полупроводники и явления переноса в полупроводниковых наноструктурах» Института физики Национальной академии наук Азербайджана. Автор 105 научных публикаций, в т. ч. 5 учебных пособий, 10 патентов

КЕРИМОВ Эльчин Ахмед оглы, кандидат физико-математических наук, доцент, начальник отдела «Исследование и моделирование элементов космических инфраструктур» Национального аэрокосмического агентства Азербайджана. Автор 50 научных публикаций, в т. ч. трех учебных пособий, и одного патента

МЕХАНИЗМ ТОКА ПЕРЕНОСА В КОНТАКТАХ СИЛИЦИД ИРИДИЯ – КРЕМНИЙ (IrSi – Si)

Создание высококачественных быстродействующих полупроводниковых приборов и интегральных микросхем требует внедрения в технологию их изготовления новых материалов. Наиболее перспективными из них являются силициды – соединения кремния с более электроположительными элементами. Эти соединения могут получаться в результате реакции в твердой фазе при температуре в интервале от в половину меньшей, чем температура плавления этого металла по абсолютной шкале, до температуры плавления. Силициды обладают высокой проводимостью металлического характера, высокой температурной стабильностью и превосходят по этим свойствам любой сильнолегированный слой полупроводника. Стабильные и надежные характеристики контактов силицид иридия – кремний (IrSi-Si) привели к широкому распространению силицидов в качестве материалов для омических контактов, затворов в метал-окисел-полупроводник-транзисторах (МДП), материалов для хранения оптической информации, фотоприемников, работающих в ИК-области спектра и т. п.

В работе исследовались электрофизические свойства структур IrSi – Si, полученных как термическим испарением, так и методом магнетронного испарения. Выявлено, что термообработка структуры до 250 °С не вызывает необратимых изменений в электрических свойствах IrSi – Si. Данные, имеющиеся в литературе, говорят о том, что высота барьера почти идеальных ($n < 1,07$) диодов Шоттки лежит в интервале 0,88 – 0,94 эВ; в то же время результаты наших измерений показали, что для IrSi – Si, полученного магнетронным распылением, она равна 0,94 эВ. Может быть, именно по этой причине пробивное напряжение не зависит от толщины IrSi, полученного магнетронным распылением, что свидетельствует об однородности контакта IrSi – Si. Эксперименты с диодами различных диаметров показали, что прямые и обратные токи пропорциональны их активной площади.

Ключевые слова: фотодиод, барьер Шоттки, Шоттковские координаты, магнетронное распыление, ток насыщения, прямые токи, обратные токи.

Температурная зависимость тока, протекающего через структуры IrSi – n – Si и IrSi – p – Si, при фиксированных значениях напряжения характеризуется прямыми в масштабе $\lg I_C \sim 1/T$, что указывает на экспоненциальную зависимость тока от температуры. Схематический разрез структуры показан на *рис. 1*.

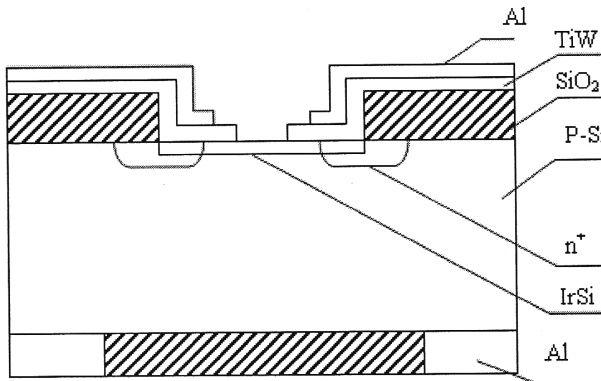


Рис. 1. Поперечное сечение фотодиод с барьером Шоттки (ФДБШ) на основе IrSi-Si

Измерения вольтамперных характеристик структур проводились в статическом режиме при помощи установки, блок-схема которой приведена в работах [1, 2]. Ток, протекающий через диод Шоттки, измерялся по падению напряжения на входном сопротивлении электрометрического усилителя, соединенного последовательно с исследуемым диодом и источником питания. Входные сопротивления усилителей предварительно градуировались посредством сравнения их номинала с эталонным сопротивлением.

Основное затруднение при измерении высокоомных образцов заключается в отсутствии возможности непосредственно измерения напряжения на образце, т. к. подключение к образцу вольтметра с малым входным сопротивлением приводит к значительной утечке тока через вольтметр. Использование же электрометрического вольтметра с очень большим входным сопротивлением в силу ряда обстоятельств приводит к появлению сильного фона, проявляющегося в результате влияния электро-

метрического измерителя тока на электрический вольтметр [3].

В ходе настоящего исследования для измерения напряжения использовался цифровой вольтметр «TR-1657», имеющий входное сопротивление меньше, чем сопротивление измеряемого образца. Вольтметр подключался параллельно цепочке, состоящей из двух последовательно соединенных сопротивлений – входного сопротивления усилителя R_{yc} и сопротивления образца $R_{об}$. Так как в процессе измерения выполнялось условие $R_{yc} < R_{об}$, т. е. выбирался такой предел измерения электрометрического усилителя, при котором его выходное сопротивление оказывалось значительно меньше сопротивления образца, то вольтметр регистрировал по существу напряжение на образце. На *рис. 2* приведена вольтамперная характеристика (ВАХ) контакта IrSi – n – Si при температуре 300° К.

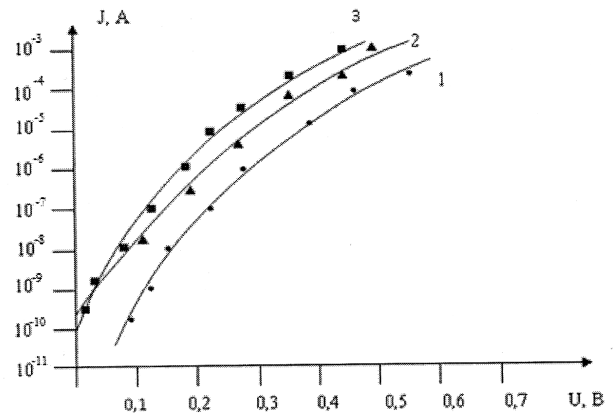


Рис. 2. Вольтамперные характеристики при разных температурах отжига: 1 – 300 °C, 2 – 400 °C, 3 – 500 °C

ВАХ структур имеют сильно униполярный вид с коэффициентом выпрямления 10^3 – 10^4 . Наблюдаемая зависимость плотности тока от приложенного напряжения хорошо согласуется с теорией термоэлектронной эмиссии:

$$J = J_s(\exp(qU/nkT) - 1), \quad (1)$$

где J_s – плотность тока насыщения, n – коэффициент неидеальности, k – постоянная Больцмана, T – температура в Кельвинах. Коэффициент

неидеальности лежит в пределах 1,12–1,64, величина плотности тока составляет 0,1 мА·см² при напряжении 7,5 В.

Высота барьера Шоттки, образующегося на границе раздела силицид иридия – кремний, вычислялась по формуле для плотности тока насыщения:

$$J_s = AT^2 \exp(q/kT)(\phi - \Delta\phi), \quad (2)$$

где ϕ – высота барьера Шоттки; $\Delta\phi$ – снижение барьера за счет сил поляризации, связанное с максимальным электрическим полем в контакте, вычисляемое по формуле:

$$\Delta\phi = (qE_m 4/\pi\epsilon_s)^{1/2}, \quad (3)$$

где $E_m = [2qN_D/\epsilon\epsilon_0(V + V_i - kT/q)]^{1/2}$. (4)

Высота барьера ϕ находится по формуле:

$$\phi = (kT/q) \ln AT^2/J_s = (-kT/0,43) \lg J/AT^2, \quad (5)$$

в которой, экстраполируя линейную часть вольт-амперной характеристики в Шоттковских координатах к нулевому напряжению до пересечения с осью токов, можно по величине тока отсечки рассчитать высоту потенциального барьера.

Рассчитанная таким образом величина потенциального барьера на границе IrSi – n – Si оказалась равной 0,94 эВ. Вольт-амперные характеристики структуры на основе IrSi – p – Si, полученные термическим путем, а также методом магнетронного распыления при комнатной температуре, ведут себя как омические. Прямые и обратные ветви ВАХ практически линейны и симметричны (рис. 3).

При охлаждении структуры до 80 °К ВАХ приобретает униполярный вид (рис. 3б). Рассчитанная величина потенциального барьера на границе IrSi – p – Si равна 0,16 эВ. Объемную информацию о механизме переноса заряда дает исследование температурной зависимости вольт-амперных характеристик. Для снятия температурных зависимостей образцы помещались в термостат, питание которого осуществлялось от автотрансформатора. Температура образца контролировалась хромель-алюмелевой термопарой, установленной непосредственно на пластине. Перед снятием температурной характеристики исследовалось

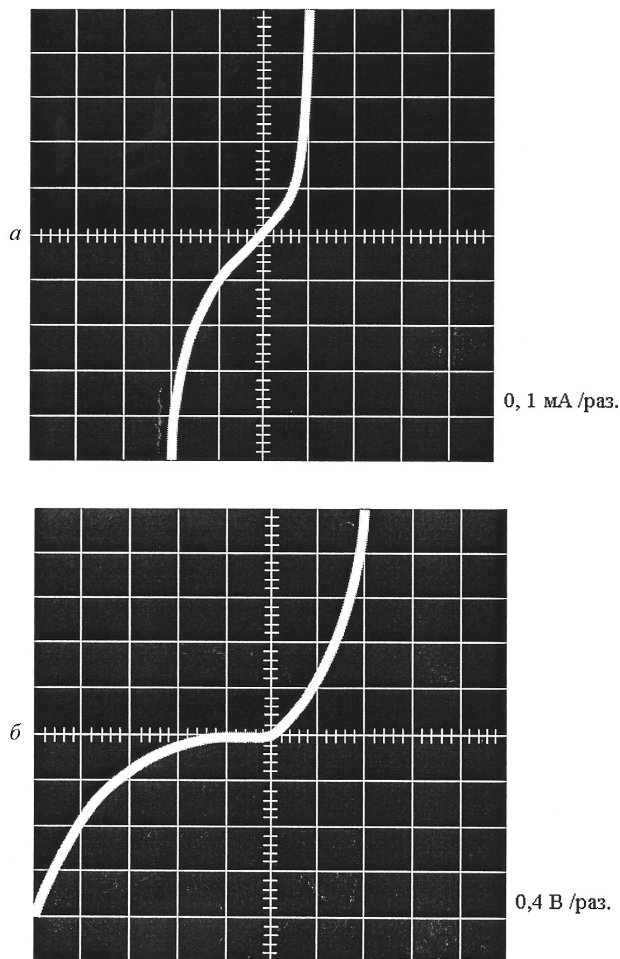


Рис. 3. Осциллограмма ВАХ диода Шоттки на основе контакта IrSi – p – Si при: а) 300 °К и б) 80 °К

влияние термообработки на электрические свойства приборов. Оказалось, что термообработка структуры до 250 °С не вызывает необратимых изменений в электрических свойствах IrSi – Si.

На рис. 4 приведена зависимость тока насыщения от температуры для контактов IrSi – n – Si и IrSi – p – Si. Температурная зависимость тока, протекающего через структуры IrSi – n – Si и IrSi – p – Si, при фиксированных значениях напряжения характеризуется прямыми в масштабе $\lg I_c \sim 1/T$, что указывает на экспонен-

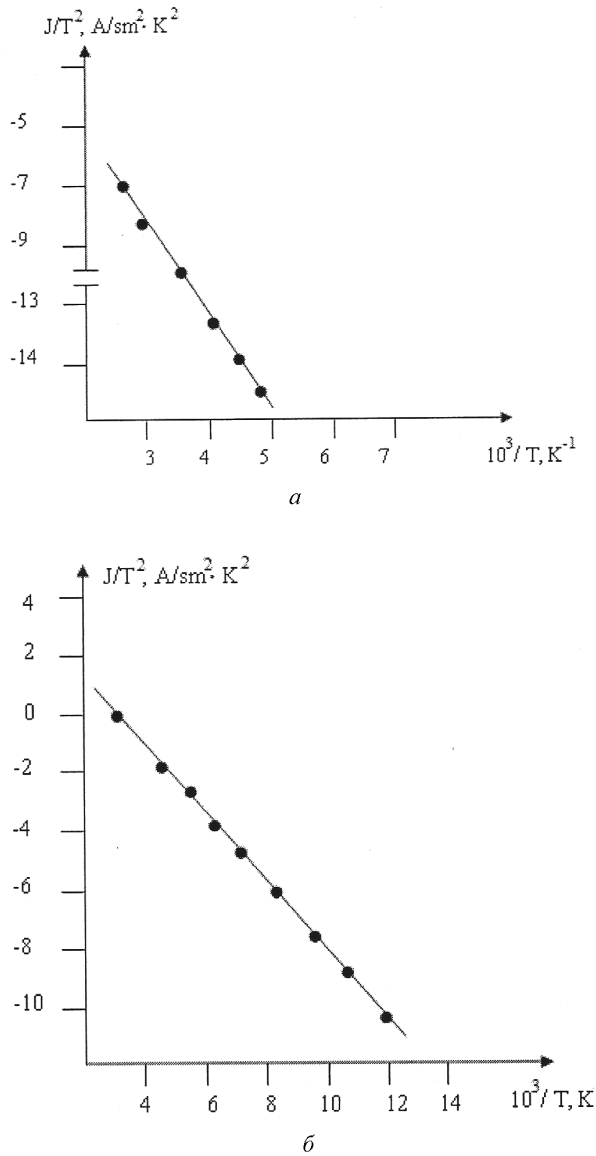


Рис. 4. Зависимость тока насыщения от температуры для контактов: а) IrSi – n – Si, б) IrSi – p – Si

циальную зависимость тока от температуры. Зависимость $J_s = f(F)$ для контактов IrSi – n – Si типична для надбарьерного механизма переноса носителей заряда.

Как известно, для надбарьерного механизма переноса носителей заряда ϕ_T не зависит от температуры, что наблюдается для контактов

IrSi – n – Si. Учет туннелирования через область пространственного заряда полупроводника и генерационно-рекомбинационного механизма приводит к монотонному уменьшению ϕ_T с понижением температуры. При преимущественном переносе носителей заряда с участием электронных состояний границы раздела ϕ_T определяются энергетическим расстоянием от уровня Ферми на поверхности до ближайшего электронного состояния, участвующего в переносе тока.

С целью предотвращения преждевременного пробоя, вызываемого усилением электрического поля на периферии контакта, использовались диффузионные охранные кольца с глубиной 0,5 мкм. Несмотря на то что пробивное напряжение увеличивалось от 13 до 28 В, насыщение отсутствовало при обратном токе барьера силицид иридия – кремний. При этом большой вклад дает снижение высоты барьера под действием сил зеркального изображения. Возможное объяснение было предложено Андриусом и Лепсельтером. Оно заключается в том, что силицид образует совершенный переход с Si и, в соответствии с моделью Хейне, волновые функции $|\psi|$ электронов проводимости в металле проникают в запрещенную зону полупроводника в виде экспоненциально затухающих волн. Эти экспоненциальные хвосты волновых функций создают электрические диполи, которые нарушают форму барьера таким образом, что высота барьера уменьшается. Изменения высоты барьера незначительны и могут быть разложены в ряд Маклорена:

$$(\Delta j)_{\text{статич.}} = \alpha \times \epsilon_m + \dots \quad (6)$$

Величина $\alpha = \partial \phi_B / \partial \epsilon_m$ может быть рассмотрена как регулируемый эмпирический параметр. Полностью количественный анализ эффекта проникновения волновых функций еще не сделан. При помощи существующих классических моделей, таких как модель Шоттки, модель Бардина и т. п., невозможно объяснить полученные результаты.

Физико-химические процессы, протекающие на границе раздела силицид иридия – кремний, сильно влияют на однородность контакта.

При образовании IrSi происходит уменьшение объема на 13 % по сравнению с иридем и кремнием [4, 5]. Такие отличия в кристаллохимических свойствах могут создать благоприятные условия для внедрения как атомов иридия, так и атомов примеси в приповерхностный слой кремния. Предполагаем, что внедрение атомов примеси в приповерхностный слой кремния приводит к неоднородности границы раздела IrSi – Si. Выявлено, что с увеличением толщины IrSi пробивное напряжение уменьшается.

Усреднением плотности тока по площади составляющих диодов в рамках трехдиодной модели для среднего значения высоты барьера получена формула [6]:

$$\varphi_B = \varphi_B^{(1)} - kT \ln \left[\omega_1 + \omega_2 l \frac{\Delta\varphi_B^{(2)}}{kT} + \omega_3 l \frac{-\Delta\varphi_B^{(3)}}{kT} \right], \quad (7)$$

где φ_B^1 – высота барьера первого диода, $\Delta\varphi_B^2$ – контрастность высот барьеров первого и третьего диодов $\omega_1 = S_1/S_0$, $\omega_2 = S_2/S_0$, $\omega_3 = 1 - (\omega_1 + \omega_2) = S_3/S_0$ – соответственно относительные площади первого, второго, третьего диодов. Здесь же параметры неоднородности приняты величины: ω_i и $\Delta\varphi_B^{(i)}$ ($i = 1, 2, 3$).

Преобразовывая формулу, получим:

$$\Delta\varphi_B = -kT \ln \left[\omega_1 + \omega_2 l \frac{-\Delta\varphi_B^{(2)}}{kT} + \omega_3 l \frac{-\Delta\varphi_B^{(3)}}{kT} \right]. \quad (8)$$

Таким образом, предложенные параметры ω_i и $\Delta\varphi_B^{(i)}$ оказываются весьма наглядным доказательством тому, как неоднородность границы раздела металл – полупроводник вызывает деградацию характеристик диодов Шоттки, в данном случае высоты барьера.

Список литературы

1. Курбатов Л.Н. Оптоэлектроника видимого и инфракрасного диапазонов спектра. М., 1999. 320 с.
2. Banhart F., Ajayan P.M. Carbon Onions as Nanoscopic Pressure Cells for Diamond Formation. London, 1996. P. 433.
3. Kukovec A., Konya Z., Kiricsi I. Single Wall Carbon Nanotubes // Encyclopedia of Nano-Science and Nanotechnology / ed. by H.S. Nalwa. American scientific publishers, 2004. Vol. 9. P. 923–946.
4. Lijima S., Ichihashi T., Ando Y. Pentagons, Heptagons and Negative Curvature in Graphite Curvature in Graphite Microtubulu Growth. London, 1992. P. 776.
5. Gmaly E. Single-Walled Carbon NT Formation with a Cintinuous CO₂-laser: Experiments and Theory. Appl. Phys., 2000. P. 161.
6. Немошкаленко В.В., Антонов В.Н. Методы вычислительной физики и теории твердого тела, зонная теория металлов. Киев, 1985.

References

1. Kurbatov L.N. *Optojelektronika vidimogo i infrakrasnogo diapazonov spectra* [Optoelectronics of Visible and Infrared Spectrum]. Moscow, 1999. 320 p.
2. Banhart F., Ajayan P.M. Carbon Onions as Nanoscopic Pressure Cells for Diamond Formation. *Nature*, 1996, no.382, p. 433.
3. Kukovec A., Konya Z., Kiricsi I. Single Wall Carbon Nanotubes. *Encyclopedia of Nano-Science and Nanotechnology*. Ed. by H.S. Nalwa. Valencia, 2004, vol. 9, pp. 923–946.
4. Lijima S., Ichihashi T., Ando Y. Pentagons, Heptagons and Negative Curvature in Graphite Curvature in Graphite Microtubulu Growth. *Nature*, 1992, no.356, pp. 776.
5. Gmaly E. Single-Walled Carbon NT Formation with a Cintinuous CO₂-laser: Experiments and Theory. *Applied Physics A*, 2000, vol. 70, p. 161.

6. Nemoshkalenko V.V., Antonov V.N. *Metody vychislitel'noj fiziki i teorii tverdogo tela, zonnaja teorija metallov* [Methods of Computational Physics and the Solid-State Theory, Band Theory of Metals]. Kiev, 1985.

Ibragimov Guseyn Behbud,
Institute of Physics of Azerbaijan National Academy of Sciences (Baku, Azerbaijan Republic)

Kerimov Elchin Akhmed,
National Aerospace Agency of Azerbaijan (Baku, Azerbaijan Republic)

THE MECHANISM OF THE CURRENT TRANSPORT IN THE IRIIDIUM SILICIDE – SILICON (IRSI-SI) CONTACTS

Constructing of the high-quality high-speed semiconductor devices and integrated circuits requires the introduction of new materials to the technology of their production. The most promising of these materials are suicides - silicon compounds with more electropositive elements. These compounds can be prepared by reacting in the solid phase at the temperatures ranging approximately from one to one-half of the melting temperature of the metal on Kelvin. Silicides have a high conductivity of metallic nature, high temperature stability and superior to any heavily doped semiconductor layer by these properties. Stable and reliable characteristics of iridium silicide contacts - silicon (IrSi-Si) have led to widespread silicides as materials for ohmic contacts, gates in metal-oxide-semiconductor transistors (MIS), materials for optical data storage, photodetectors, operating in the infrared region of the spectrum, and so on.

We investigated the electrical properties of structures IrSi - Si, as obtained by thermal evaporation and by magnetron evaporation. It is established that the heat treatment of the structure up to 250 ° C does not cause irreversible changes in the electrical properties IrSi - Si. The barrier height of ϕ_b of nearly ideal ($n < 1,07$) the Schottky diodes is in the range 0,88 – 0,94 eV. At the same time, the results of our measurements show that for ϕ_b of IrSi - Si, obtained by magnetron sputtering, is 0,94 eV. Perhaps for this reason, the breakdown voltage does not depend on the thickness of IrSi, obtained by magnetron sputtering, indicating homogeneity of the contact IrSi - Si. Experiments with diodes of different diameters showed that the direct and reverse currents are proportional to the active area.

Keywords: *photo diode, Schottky barrier, Shottky coordinates, magnetron sputtering, saturation current, direct currents, reverse currents.*

Контактная информация:
Ибрагимов Гусейн Бехбуд оглы
адрес: 1100, г. Баку, ул. А. Аббасова, д. 11;
e-mail: I_Quseyn.fizik@mail.ru

Керимов Эльчин Ахмед оглы
адрес: 1100, г. Баку, ул. А. Аббасова, д. 11;
e-mail: E_Kerimov.fizik@mail.ru

Рецензент – *Шестаков Л.Н.*, доктор физико-математических наук, профессор, первый проректор по образованию и науке Северного (Арктического) федерального университета имени М.В. Ломоносова