

УДК 621.382.022

**ДЕЙСТВУЮЩИЙ ПОТЕНЦИАЛЬНЫЙ БАРЬЕР  
НЕОДНОРОДНОГО ПЕРЕХОДА МЕТАЛЛ - КРЕМНИЙ****А.Р.АСЛАНОВА, М.А.ЕГАНЕХ**  
*Бакинский Государственный Университет*  
*aslanova78@yahoo.com*

*Представлены результаты исследования особенности действующего потенциального барьера перехода металл - кремний с дополнительным электрическим полем, возникающим вследствие структурной неоднородности границы раздела. Показано, что вклад периферийного тока в ток общего перехода для прямой ветви ВАХ поверхностно-барьерного перехода с диаметром в интервале 100 – 1000 мкм составляет меньше 20 %, коэффициент идеальности имеет значение около единицы, высота потенциального барьера и контактное сопротивление остаются постоянными в зависимости от размера перехода.*

**Ключевые слова:** контакт металл – полупроводник, барьер Шоттки, диод Шоттки, дополнительное электрическое поле, полупроводниковые преобразователи.

Поверхностно-барьерные переходы (ПБП) металл – полупроводник широко используются в современных электронных устройствах и их электрофизические свойства интенсивно исследуются. Отклонение прямой ветви вольт-амперной характеристики (ВАХ) от теории, отсутствие насыщения на обратной ветви ВАХ, преждевременный электрический пробой перехода, трудновоспроизводимость электрофизических параметров и другие важные проблемы ПБП все еще детально изучаются, хотя существуют фундаментальные теории идеальных контактов металл-полупроводник [1-2].

Реальные ПБП металл – полупроводник обычно изготавливаются путем нанесения металлических тонких пленок на определенные поверхности монокристаллических полупроводниковых пластин. Металлические пленки из-за множества объективных причин, в том числе, неоднородности стехиометрического составов, состояния поликристаллической структуры и т.д., имеют неоднородные границы раздела, состоящие из

совокупности микро- и наноучастков с различной высотой локальных потенциальных барьеров [3-5]. В ряде случаев, значения электрофизических параметров ПБП управляются путем изменения степени неоднородности границы раздела [6-7].

Последние годы уделяется большое внимание исследованию электрофизических свойств реальных ПБП с учетом возникновения дополнительного электрического поля (ДЭП) как вследствие неоднородности высоты локальных потенциальных барьеров вдоль границы раздела, так и ограниченности контактной поверхности со свободными поверхностями металла и полупроводника [8-12].

В данной работе представлены результаты исследования особенности действующего потенциального барьера ПБП металл – кремний с учетом ДЭП, возникающего вследствие неоднородности границы раздела, состоящей из совокупности взаимодействующих микро- и наноучастков с различными высотами локальных потенциальных барьеров.

#### Экспериментальная методика

Структуры ПБП на основе контакта тонкой пленки меди с планарной поверхностью кремния n-типа изготавливались методом стандартной фотолитографии. На планарной поверхности кремниевой пластины с кристаллографической ориентацией (111) и удельным сопротивлением 1 Ом см выращивался тонкий диэлектрический слой  $\text{SiO}_2$  толщиной порядка 0,3 мкм. В слое  $\text{SiO}_2$  вскрывались окна с различными диаметрами (60 - 1000 мкм). Пленки Cu толщиной около 0,5 мкм были получены термическим испарением в вакууме  $10^{-4}$  Па в окнах  $\text{SiO}_2$  на поверхности Si. Пленки металла Cu имели достаточно большую площадь, перекрывающую диэлектрический слой  $\text{SiO}_2$  по периферии окон для предотвращения искривления приповерхностного обедненного слоя полупроводника по периферии контакта. Омический контакт создавался нанесением пленки алюминия на обратной сильнолегированной поверхности кремниевых пластинок.

Статические ВАХ ДШ снимались при комнатной температуре на традиционной экспериментальной установке. Высота потенциального барьера, коэффициент неидеальности и контактное сопротивление ПБП определялись методом ВАХ. Были определены периферийные токи  $I_L$ , протекающие через периферийный участок контактной поверхности, токи  $I_S$ , протекающие через контактную поверхность ПБП без влияния периферийных эффектов. При этом были использованы усредненные линейные плотности  $J_L$  периферийных токов  $I_L$ , обусловленных лишь периферийными эффектами ПБП, по формуле [2]:

$$J_L = (NI - I_S)/(NL - L_S), \quad (1)$$

где  $L$ - длина периферии контакта ПБП, через который протекает ток  $I_L$ ;  $L_0$ - длина периферии контакта эталонного ПБП с диаметром 1000 мкм, через который протекает ток  $I_0$ ;  $N$  - количество ПБП с током  $I$  и длиной периферии  $L$ , суммарная площадь которых равна площади контакта идентичного им эталонного ПБП с диаметром 1000 мкм

Токи  $I_L$  и  $I_S$  ПБП определяются следующими формулами:

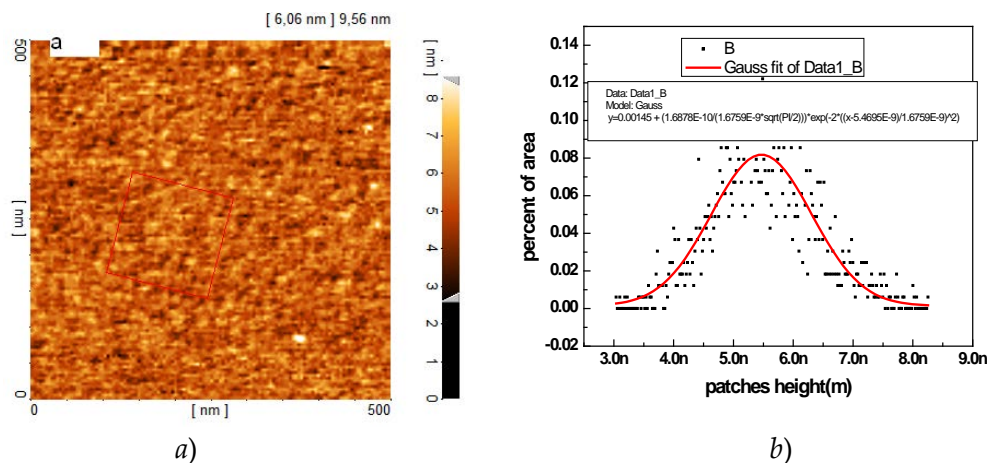
$$I_L = J_L L \quad I_S = I - I_L \quad (2)$$

Атомно-силовое микроскопическое (АСМ) исследование проводилось с помощью DualScope™ DS 95-200/50.

### Экспериментальные результаты и их обсуждение

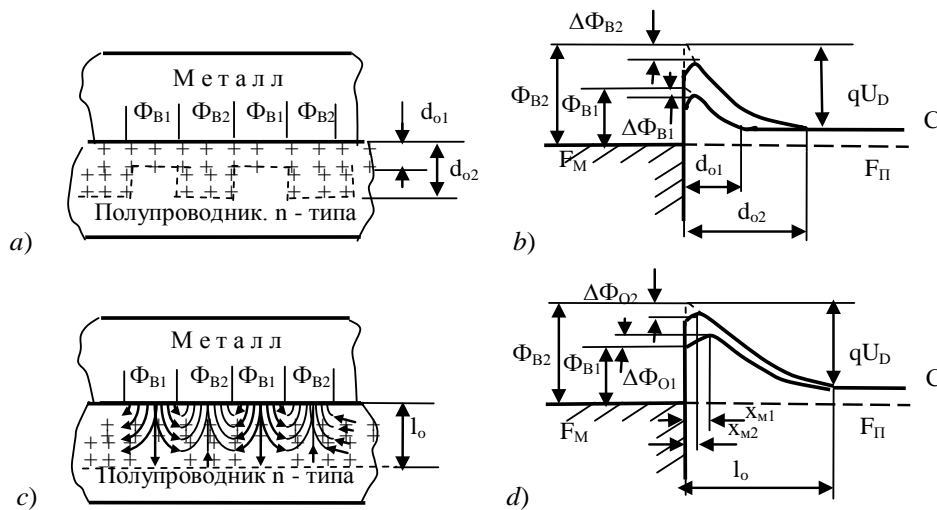
Реальные переходы металл – полупроводник обычно изготавливаются путем нанесения металлических тонких пленок на определенные поверхности монокристаллических полупроводниковых пластин. Граница раздела ПМП является неоднородной по высоте локальных потенциальных барьеров и она состоит из совокупности параллельно соединенных и взаимодействующих микро- и наночастиц.

На рис.1 представлены АСМ изображение топографии (а) поверхности тонкой пленки металла толщиной 100-200 нм, нанесенной методом термического испарения на планарной поверхности кремниевой пластины, и распределение по размерам (b) наночастиц тонкой пленки. Видно, что тонкая пленка металла на поверхности кремния содержит нанокристаллиты с линейными размерами 20-40 нм и они неравномерно распределены на поверхности.



**Рис.1.** АСМ изображение топографии поверхности тонкой пленки никеля на поверхности кремния (а) и распределение по размерам наночастиц тонкой пленки (b).

Для определенности, рассмотрим контакт между металлом с работой выхода  $\Phi_{M1}$  и  $\Phi_{M2}$  и полупроводником *n*- типа с работой выхода  $\Phi_{\Pi}$ , где выполняется условие  $\Phi_{M2} > \Phi_{M1} > \Phi_{\Pi}$  и следовательно,  $\Phi_{B2} > \Phi_{B1} > 0$ . При этом в случае отсутствия электрического взаимодействия между ними, в приповерхностном слое полупроводника образовался бы обедненный слой из неподвижных объемных зарядов глубиной  $d_{o1}$  для участков с  $\Phi_{M1}$  и глубиной  $d_{o2}$  для участков с  $\Phi_{B2}$ , где  $d_{o2} > d_{o1}$  (рис.2а). Соответствующие энергетические диаграммы участков с  $\Phi_{B1}$  и с  $\Phi_{B2}$  представлялись бы как на рис.2б. В действительности, из-за взаимодействия участков поверхности металла с  $\Phi_{B1}$  и  $\Phi_{B2}$  возникает поле пятен, которое проникает в полупроводник на глубину  $l_o$ . В результате этого, для участков с  $\Phi_{B1}$  обедненный слой расширяется на глубину  $l_o$  (рис.2с) и образуется дополнительный потенциальный барьер на величину  $\Delta\Phi_{O1}$ , максимум которого находится на расстоянии  $x_{M1}$  от поверхности металла, а для участка с  $\Phi_{B2}$  высота барьера уменьшается на величину  $\Delta\Phi_{O2}$ , как в случае влияния силы изображения, и его максимум находится на расстоянии  $x_{M2} < x_{M1}$  (рис.2д).



**Рис.2.** Схематические структуры и энергетические диаграммы параллельно соединенных взаимодействующих выпрямляющих контактов металла с полупроводником *n*-типа при наличии внешнего напряжения.

Таким образом, в реальных ПБП металл-полупроводник из-за взаимодействия микроучастков с различными высотами локальных потенциальных барьеров возникает ДЭП (т.е. поле пятен), направленное противоположно для различных микроучастков. Под действием ДЭП реальный ПБП характеризуется действующим потенциальным барьером.

Типичные прямые ветви ВАХ Cu-nSi ПБП с различными диаметрами (60 – 1000 мкм) представлены на рис.3а.

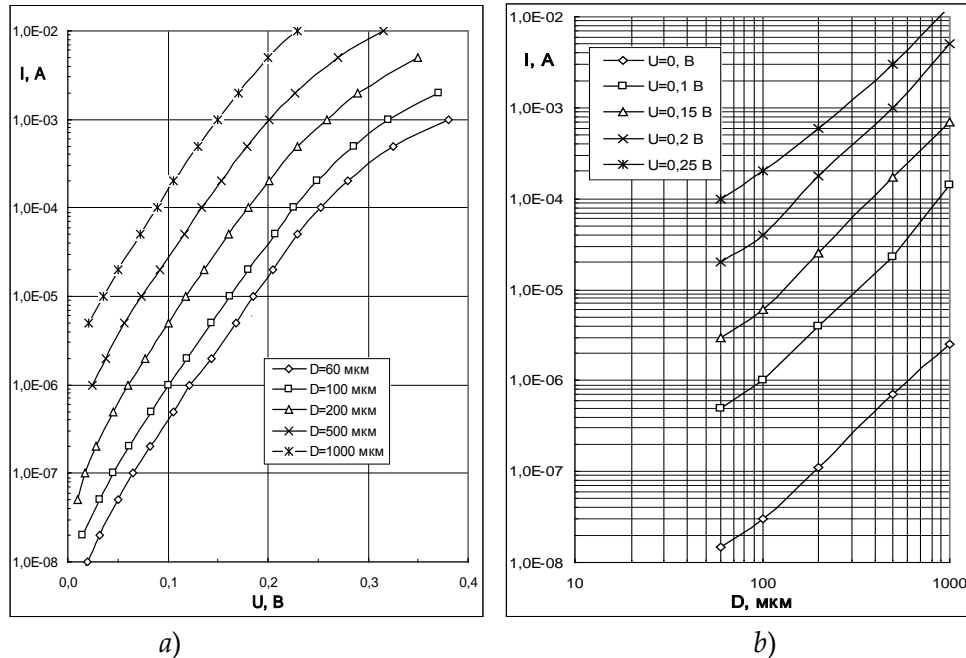


Рис.3. Прямые ветви ВАХ Cu-nSi ПБП с различными диаметрами (а) и зависимости силы тока (I) от диаметра (D) ПБП при различных напряжениях (b).

Из рис. 3а видно, что экспериментально наблюдаемые прямые ветви ВАХ ПБП, при  $qU > kT$  описываются теорией термоэлектронной эмиссии и выражается формулой [2]:

$$\begin{aligned}
 I &= SAT^2 \left[ \exp\left(-\frac{\Phi_B - \Delta\Phi_B}{kT}\right) \right] \exp\left(\frac{qU}{nkT}\right) = \\
 &= SAT^2 \exp\left(-\frac{\Phi_B}{kT}\right) \exp\left(\frac{qU}{nkT}\right) = I_{OF} \exp\left(\frac{qU}{nkT}\right),
 \end{aligned} \tag{3}$$

где  $S$ - площадь перехода,  $A$ - постоянная Ричардсона,  $T$ - абсолютная температура,  $\Phi_B$  - высота действующего потенциального барьера,  $k$ - постоянная Больцмана,  $q$ - заряд носителя тока,  $\Delta\Phi_B$  - снижение высоты действующего потенциального барьера.

В реальных ПБП заметное влияние оказывают периферийные процессы, которые по характеру отличаются от соответствующих процессов в центральной области перехода, следовательно, периферийные токи ПБП вносят определенный вклад на общий ток ВАХ ПБП. На рис.3b представ-

лены зависимости силы токов Cu-nSi ПБП от диаметра ( $D$ ) при различных напряжениях в логарифмическом масштабе. Из рисунков видно, что эти зависимости изображаются прямыми линиями и тангенс угла наклона составляет почти 2. Это означает, что ВАХ ПБП характеризуется током почти всей контактной поверхности.

Были вычислены высота действующего потенциального барьера ( $\Phi_B$ ), коэффициент идеальности ( $n$ ) и сопротивление контакта ( $R_C$ ), линейная плотность ( $J_L$ ) периферийного тока и вклады периферийного тока ( $g_L$ ) и тока внутренней части перехода ( $g_S$ ) к общему току ПБП с различными диаметрами ( $D$ ), которые представлены в таблице 1.

Таблица 1

$D$ мкм	$I_0$ А	$J_L$ А/мкм	$g(I_L)$ %	$g(I_S)$ %	$\Phi_{BЭ}$ эВ	$n$	$R_C$ Ом см <sup>2</sup>
60	$1,5 \cdot 10^{-8}$	$3,4 \cdot 10^{-11}$	43	57	0,616	1,01	48
100	$3,0 \cdot 10^{-8}$	$1,8 \cdot 10^{-11}$	19	81	0,625	1,01	67
200	$1,1 \cdot 10^{-7}$	$2,0 \cdot 10^{-11}$	11	89	0,627	1,02	67
500	$6,5 \cdot 10^{-7}$	$3,1 \cdot 10^{-11}$	8	92	0,629	1,02	76
1000	$2,5 \cdot 10^{-6}$	$3,1 \cdot 10^{-11}$	4	96	0,630	1,01	70

Из таблицы видно, что с ростом  $D$  от 100 мкм до 1000 мкм высота действующего барьера  $\Phi_B$  и контактное сопротивление  $R_C$  ПБП остаются постоянными и коэффициент  $n$  имеет значение около единицы. Параметры  $J_L$  и  $g_L$  ПБП имеют достаточно низкие значения, что означает незначительное влияние периферийных процессов.

Выше представленные результаты экспериментальных исследований описывают картину токопрохождения в Cu-nSi ПБП при прямом направлении смещения. Интересно отметить, что прямые ветви неоднородных ПБП характеризуются коэффициентами идеальности близкими единице как в идеальных ПБП, что обусловлено снижением высоты барьера под действием сил зеркального изображения  $\Delta\Phi_B$  в зависимости от напряжения  $U$  описываемой формулой [1]:

$$\Delta\Phi_B = q \left[ \left( \frac{q^3 N_D}{8\pi^2 \varepsilon_s^3} \right) \left( U_D - U - \frac{kT}{q} \right) \right]^{\frac{1}{4}}, \quad (4)$$

где  $N_D$  - концентрация доноров в полупроводнике,  $\varepsilon_s$  - диэлектрическая проницаемость полупроводника,  $U_D$  - диффузионный потенциал.

### Заключение

Таким образом, исследованы особенности действующего потенциального барьера ПБП металл – кремний с учетом ДЭП, возникающего вследствие неоднородности границы раздела, состоящей из совокупности взаимодействующих микро- и наночастиц с различными высотами локальных потенциальных барьеров.

Установлено, что вклад периферийного тока в ток общего перехода для прямой ветви ВАХ поверхностно-барьерного перехода с диаметрами в интервале 100 – 1000 мкм составляет меньше 20 %, коэффициент идеальности имеет значение около единицы, высота действующего потенциального барьера и контактное сопротивление остаются постоянными не для всех переходов.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Зи С.М. Физика полупроводниковых приборов, часть 1. М.: Мир, 1984, 450 с.
2. Мамедов Р.К. Контакты металл – полупроводник с электрическим полем пятен. Баку: БГУ, 2003, 231 с.
3. Tung R. T. The Physics and Chemistry of the Schottky Barrier Height, Appl. Phys. Rev. 1, 011304 (2014)
4. Tu K.N.Chu W.K., Mayer J.W. Structure and growth kinetics of Ni<sub>2</sub>Si on Silicon. Thin Solid Films, 1975, v25, №2, p.403-413.
5. Elzenberg, M., Foell H., Tu K. N. Formation of Shallow Schottky contacts to Si using Pt-Si and Pd-Si alloy Films, Appl. Phys. 1981, v. 52, No 2, p. 861-868
6. Tu K.N. Contact for Shallow junctions. Thin Solid Films, 1986, v.140, No1, p.71-78
7. Kang M.S., Ahn J.J., Moon K.S., Koo S.M. Metal Work – Function-Dependent Barrier Height of Ni Contacts with Metal-embedded Nanoparticles to 4H-SiC. Nanoscale Research Letters, 2012, 7, 75
8. Мамедов Р.К. Особенности дополнительного электрического поля в реальных контактах металл – полупроводник. Вестник Бакинского Университета: серия физ.мат. наук. 2013, № 4, с. 128–163.
9. Торхов Н.А., Божков В.Г., Ивонин И.В., Новиков В.А. Исследование распределения потенциала на локально металлизированной поверхности nGaAs методом Атомно – Силовой Микроскопии. Поверхность: рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования. 2009, № 1, с.57-66
10. Торхов Н.А. Влияние периферии контактов металл – полупроводник с барьером Шоттки на их электрофизические характеристики. ФТП, 2011, т.45, в.1, с.70-86.
11. Mamedov R.K. Features of the Potential Barrier and Current Flow in the Narrow Schottky Diodes. Superlattices and Microstructures, 2013 v.60, p. 300–310
12. Николаевич М.О., Иванович Б.Л., Федорович К.А., Александрович Н.В., Сергеевич С.А., Торхов Н.А. Моделирование электростатической системы контакта Шоттки. Актуальные проблемы современной науки в 21 веке. Сборник материалов 2-й Международной научно-практической конференции. Махачкала, 2013, с. 36-40

## QEYRİ-BİRCİNS METAL – SİLİSİUM KEÇİDİNİN İŞLƏK POTENSİAL ÇƏPƏRİ

Ə.R. ASLANOVA, M.A. YEGANEH

### XÜLASƏ

Sərhəd səthinin struktur qeyri-bircinsliyi hesabına yaranan əlavə elektrik sahəli metal-silisiyum keçidinin işlək potensial çəpərinin xüsusiyyətlərinin tədqiqinin nəticələri təqdim olunmuşdur. Göstərilmişdir ki, diametri 100 – 1000 mkm intervalında olan səthi potensial çəpərli keçidin düz istiqamətdə VAX-nın ümumi cərəyanında periferiya cərəyanı 20%-dən az hissəsini təşkil edir, ideallıq əmsalı vahidə yaxındır, potensial çəpərin hündürlüyü və kontakt müqaviməti keçidin ölçülərindən asılı olmayaraq dəyişməz qalır.

**Açar sözlər:** metal-yarımkeçirici kontakt, Şottki diodu, Şottki çəpəri, əlavə elektrik sahəsi, yarımkeçirici çevricilər.

## OPERATING POTENTIAL BARRIER OF NONUNIFORM JUNCTION METAL – SILICON

A.R.ASLANOVA, M.A.EGANEH

### SUMMARY

The paper provides the results of the research of the features of the potential barrier of the metal - silicon with an additional electric field arising due to structural inhomogeneity interface. It is shown that the contribution of peripheral current to the general current I-V characteristic of the surfactant barrier junction with diameters in the range of 100 - 1000 micrometers is less than 20%, ideality factor is close to unity value, the potential barrier height and the contact resistance remain constant depending on the dimensions of the junction.

**Key words:** contact metal – semiconductor, Schottky barrier, Schottky diode, an additional electric field, semiconductor converters

*Поступила в редакцию: 26.12.2014 г.*

*Подписано к печати: 13.02.2015 г.*