

## FİZİKA

УДК 621.382

ОСОБЕННОСТИ ДОПОЛНИТЕЛЬНОГО ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОЛЯ  
В РЕАЛЬНЫХ КОНТАКТАХ МЕТАЛЛ – ПОЛУПРОВОДНИК

P.K.MAMEDOV

*Бакинский Государственный Университет**rasimaz50@yahoo.com*

*В данном обзоре изложены физические основы неизвестного ранее физического явления возникновения дополнительного электрического поля (ДЭП) в реальных контактах металл – полупроводник (КМП). Представлены результаты непосредственного измерения ДЭП методами Атомно-Силовой Микроскопии в КМП с различными конфигурациями, геометрическими размерами, контактирующими материалами и расстояниями между ближе расположенных контактов. Показаны специфические особенности ДЭП в электрофизических, термоэлектрических, фотоэлектрических и конструктивно – технологических экспериментальных измерениях КМП с макро, микро и наноструктурами.*

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

Неизвестное ранее физическое явление возникновения дополнительного электрического поля (ДЭП) в реальных контактах металл – полупроводник (КМП), установлено в результате целенаправленных научно-исследовательских работ в свете детальных анализов надежных результатов теоретических и экспериментальных всесторонних исследований, проведенных выдающимися учеными – специалистами известных Научных Центров мира с использованием новейших технологии, техники и методики современной микроэлектроники и нанотехнологии [1,6]. Оно является уже третьим открытием после двух открытия диодного и транзисторного эффектов в чудесном простом контакте металл – полупроводника.

Первое открытие диодного эффекта Ф.Брауном в 1874 году [2] и второе открытие Д.Бардином, У.Браттейном и У.Шокли транзисторного эффекта в 1949 году [3] в обыкновенном КМП являлись фундаментальными научными основами научно-технических прогрессов в развитиях радиотехники в первой и транзисторной электронной техники во второй половинах прошлого века, и авторы этих открытий стали лауреатами Нобелевских Премий. Ни одно из открытий современной физики не повлияло столь непосредственно на жизнь людей, как тран-

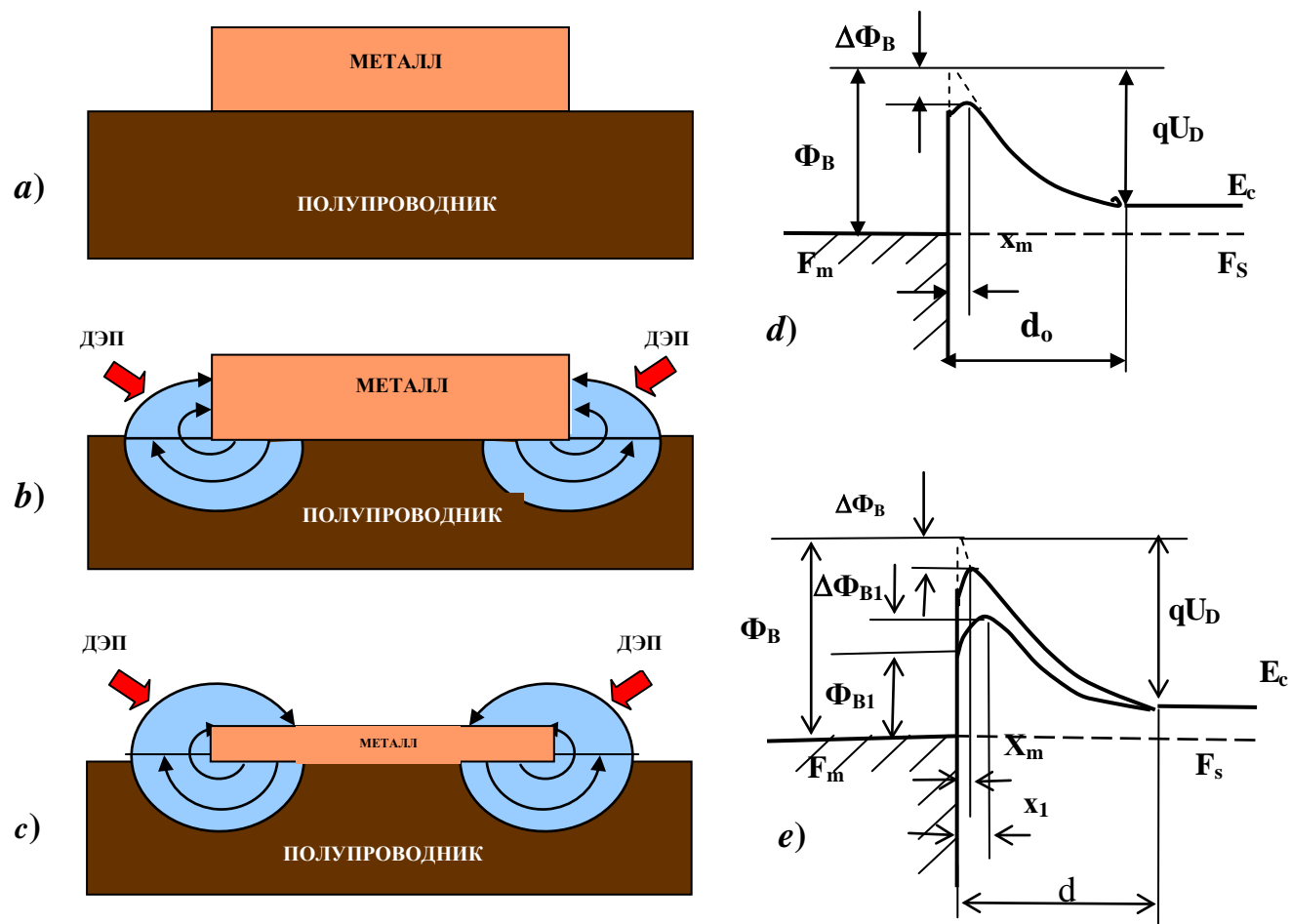
зисторный эффект [4]. Несомненно, новое явление возникновения ДЭП в этом же КМП может значительно расширить перспективы бурного развития современной электронной техники и, особенно, микроэлектроники и нанотехнологии.

В данном обзоре изложены физические основы возникновения ДЭП в КМП, представлены результаты непосредственного измерения ДЭП методами Атомно-Силовой Микроскопии и показаны специфические особенности ДЭП в электрофизических, термоэлектрических, фотоэлектрических и конструктивно – технологических экспериментальных измерениях КМП.

### **Сущность явления возникновения дополнительного электрического поля в реальных контактах металл – полупроводник**

Физический механизма возникновения ДЭП в КМП аналогичен физическому механизму образования потенциального барьера в идеализированных КМП по известной теоретической модели Шоттки [5]. Согласно этой модели, если определенная поверхность металла с работой выхода  $\Phi_M$  непосредственно контактируется с поверхностью полупроводника  $n$ - типа с работой выхода  $\Phi_S$  и  $\Phi_M > \Phi_S$  (рис.1,*a*), то из-за контактной разности потенциалов контактирующих поверхностей в приконтактной области полупроводника образуется обедненный слой с глубиной  $d_o$  и в нем потенциальный барьер с высотой  $\Phi_B = \Phi_M - \chi$  (здесь  $\chi$  - электронное сродство полупроводника) и расстоянием  $x_m$  максимума потенциального барьера от поверхности металла, следовательно, КМП обладает диодными свойствами. Энергетическая диаграмма такого диода Шоттки с учетом снижения высоты потенциального барьера на величину  $\Delta\Phi_B$  под влиянием силы зеркального изображения схематично изображается как на рис.1,*b*.

В действительности [6], при непосредственном контакте металла с полупроводником, работы выхода ( $\sim 4-5$  эВ) их свободных поверхностей, примыкающих контактной поверхности остаются неизменными, а высота потенциального барьера контактной поверхности становится порядка 1 эВ. Возникновение контактной разности потенциалов между контактной поверхностью и примыкающими к ней свободными поверхностями металла и полупроводника образует ДЭП с достаточно большой напряженностью вокруг боковой области металла. Это схематично представлено для КМП с широкой контактной поверхностью и достаточно большой толщиной металла на рис.1,*c* и низкой толщиной металла на рис.1,*d*, где ДЭП прикрывает свободной поверхности металла и проникает в полупроводник на глубине  $d$ . Максимальное значение напряженности ДЭП в приконтактной области полупроводника, направленной от контактной поверхности к свободным поверхностям металла и полупроводника, вполне соизмеримо с аналогичной напряженностью диода Шоттки. Поэтому широкий КМП характеризуется двумя высотами потенциального барьера в краевой ( $\Phi_{B1}$ ) и центральной ( $\Phi_B$ ) областях контакта и его энергетическая диаграмма схематично изображена как на рис.1,*e*.



**Рис.1.** Схематические структуры контакта металл – полупроводник с широкой контактной поверхностью без ДЭП (a), с ДЭП и большой толщиной металла (b), с ДЭП и меньшей толщиной металла (c). Энергетические диаграммы выпрямляющего широкого контакта металла с полупроводником n-типа без ДЭП (d) и с ДЭП (e).

При достаточно узких КМП с микро- и нанометрическими размерами контактной поверхности ДЭП проникает вглубь полупроводника и полностью охватывает приконтактную область полупроводника. При этом КМП характеризуется единой действующей высотой потенциального барьера  $\Phi_{ВД}$ , сформированной в результате суперпозиции ДЭП и объемных пространственных зарядов (ОПЗ).

Согласно основным известным законам электростатики, силовые и энергетические характеристики ДЭП определяются конфигурацией, геометрическими размерами КМП и природой, электрофизическими параметрами контактирующих материалов. В этой связи, напряженность и потенциал ДЭП КМП с определенной конструктивной структурой и характер их распределения вокруг контакта становятся зависящими от конструктивно-технологических параметров, в частности, от кривизны боковой поверхности, толщины металла, типа проводимости и концентрации примесей полупроводника. По мере удаления от поверхности металла к внешней границе полевого пространства ДЭП КМП, напряженность и потенциал ДЭП уменьшаются. С ростом толщины и уменьшением кривизны боковой поверхности металла КМП, происходит расширение полевого пространства ДЭП вокруг контакта и, наоборот, с уменьшением толщины и увеличением кривизны боковой поверхности металла происходит пространственное сужение полевого пространства ДЭП вокруг контакта.

Кроме того, проникновение в полупроводник неоднородного ДЭП с напряженностью, направленной от контактной поверхности металла к свободным поверхностям полупроводника и металла (рис. 1, *b, c*), участвует в образовании действующего потенциального барьера и токопрохождении реальных КМП с определенными конструктивными параметрами.

Результаты непосредственных измерений потенциалов ДЭП реальных КМП, их зависимостей от геометрических параметров контакта и электрофизических параметров полупроводника с методами Атомно-Силовой Микроскопии (АСМ) высоким пространственным разрешением и точностью находятся в хорошем согласии с вышесказанными электрофизическими свойствами ДЭП.

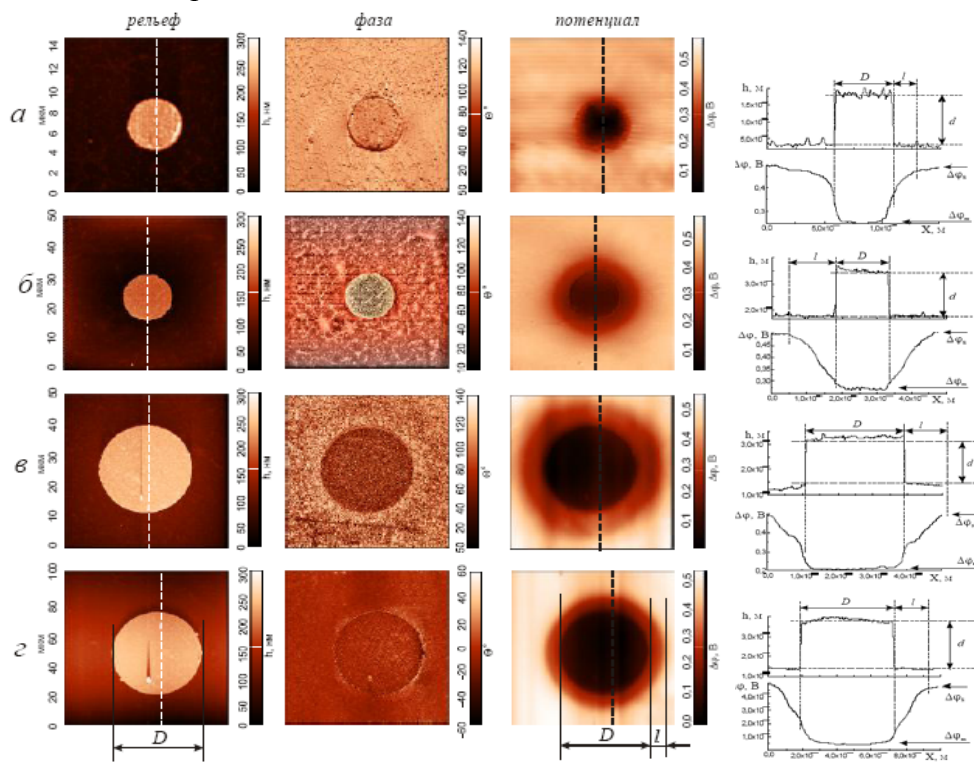
#### **АСМ измерения особенностей ДЭП в зависимости от диаметров КМП и толщины металлического контакта**

АСМ изображения пространственного рельефа, фазового контраста и контактной разности потенциалов (КРП) между зондом  $W_2C$  кантливера и поверхностью эпитаксиального Au - nGaAs (100) диодов Шоттки, с различными диаметрами 5, 15, 30, 50 мкм и толщиной металла 0.2 мкм, полученных в [7] представлены на рис. 2.

На изображениях рельефа (первая колонка “поверхность”) отчетливо видны одиночные круглые контакты. Изображения фазового контраста (вторая колонка “фаза”) подтверждают и дополняют результаты исследования рельефа. Фазовый контраст поверхности GaAs одинаков как вблизи периметра контакта, так и на свободной поверхности вдали от контактов. Из АСМ изображения потенциала (третья колонка “потенциал”) видно, что измеряемая КРП в области контакта заметно меньше измеряемой КРП на поверхности эпитаксиального n типа GaAs. Во-

круг периметров контактов под действием ДЭП образуется осесимметричная протяженная область (ореол) шириной  $l$  с КРП отличной от КРП свободной поверхности nGaAs ( $N_D=3 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3}$ ). По мере удаления от периметра контакта напряженность ДЭП уменьшается и под его действием значение КРП ореола на свободной поверхности постепенно увеличивается от минимального, характерного для КРП поверхности металла ( $\Delta\phi_m$ ), до максимального значения ( $\Delta\phi_s$ ), характерного для КРП свободной поверхности nGaAs. В тоже время, можно увидеть закономерное увеличение ширины ореола изменения потенциала  $l$  с расширением полевого пространства ДЭП при увеличении диаметра контакта ( $D$ ), т.е. при уменьшении кривизны окружности края металла.

На рис. 2 также представлены пространственные  $h(x)$  и потенциальные  $\Delta\phi(x)$  сечения рельефов поверхностей по местам проведения пунктиров для nGaAs и металлических контактов с диаметрами 5; 15; 30 и 50 мкм. Видно, что области металла соответствует область максимального понижения КРП и при постепенном удалении от контакта вдоль поверхности (по оси OX) на расстоянии  $l$  значение КРП под действием ДЭП постепенно увеличивается до значения КРП свободной поверхности GaAs.



**Рис. 2.** Двумерные АСМ изображения рельефа, фазового контраста, КРП, пространственных  $h(x)$  и потенциальных  $\Delta\phi(x)$  сечений рельефов поверхности nGaAs(100) с концентрацией доноров  $3 \times 10^{15} \text{ см}^{-3}$  с расположенными на ней металлом (Au) толщиной  $d \approx 0,2 \text{ мкм}$  с диаметрами D: а) 5 мкм; б) 15 мкм; в) 30 мкм и г) 50 мкм.

Результаты АСМ измерений КРП контакта  $\Delta\varphi_m$  (где,  $\Delta\varphi_m = \varphi_{w2c} - \varphi_m$ ) и свободной поверхности полупроводника  $\Delta\varphi_s$  (где,  $\Delta\varphi_s = \varphi_{w2c} - \varphi_s$ ), изменения потенциала  $\Delta\varphi$  (где,  $\Delta\varphi = \Delta\varphi_s - \Delta\varphi_m$ ), ширины ореола  $l$  ДЭП, работы выхода контактного металла  $\varphi_m$  для эпитаксиального Au-nGaAs (100) диода Шоттки с различными диаметрами  $D$  и различными толщинами металла  $d$ , а также изменение работы выхода контакта под действием ДЭП  $\Delta\varphi_{Au-m}$  (где  $\Delta\varphi_{Au-m} = \varphi_{Au} - \varphi_m$ ) относительно работе выхода сплошной пленки золото  $\varphi_{Au}$  на поверхности n<sup>+</sup>GaAs приведены в таблице 1.

Из таблицы 1 видно, что с увеличением диаметров контактов от 5 до 50 мкм для КМП с толщиной металла равной около 0,2 мкм происходит увеличение ширины ореола  $l$  от 2 до 25 мкм и величина  $\Delta\varphi_{s-m}$  от 0,230 до 0,500 эВ и для КМП с толщиной металла равной около 0,075 мкм происходит увеличение  $l$  от 1,5 до 8 мкм и величина  $\Delta\varphi_{s-m}$  от 0,18 до 0,33 эВ. В тоже время, под действием ДЭП работы выхода контактов уменьшаются на величину  $\Delta\varphi_{Au-m}$  относительно работе выхода сплошной пленки золото  $\varphi_{Au}$  на поверхности n<sup>+</sup>GaAs (где  $\varphi_{Au}=5,124$  эВ) и это изменение становится более существенным с уменьшением диаметров контактов. Для КМП с толщиной металла равной 0,2 мкм и диаметром 5 мкм это уменьшение составляет 0,572 эВ, а для КМП с диаметром 50 мкм – составляет 0,232 эВ. Дальнейшие АСМ исследование показывает, что для эпитаксиального Au - nGaAs (100) контакта с диаметром больше 100 мкм влияние ДЭП становится незначительно.

**Таблица 1**

Численные значения АСМ измерений методом КРП Au-nGaAs КМП структур с разными диаметрами (5 – 50 мкм)

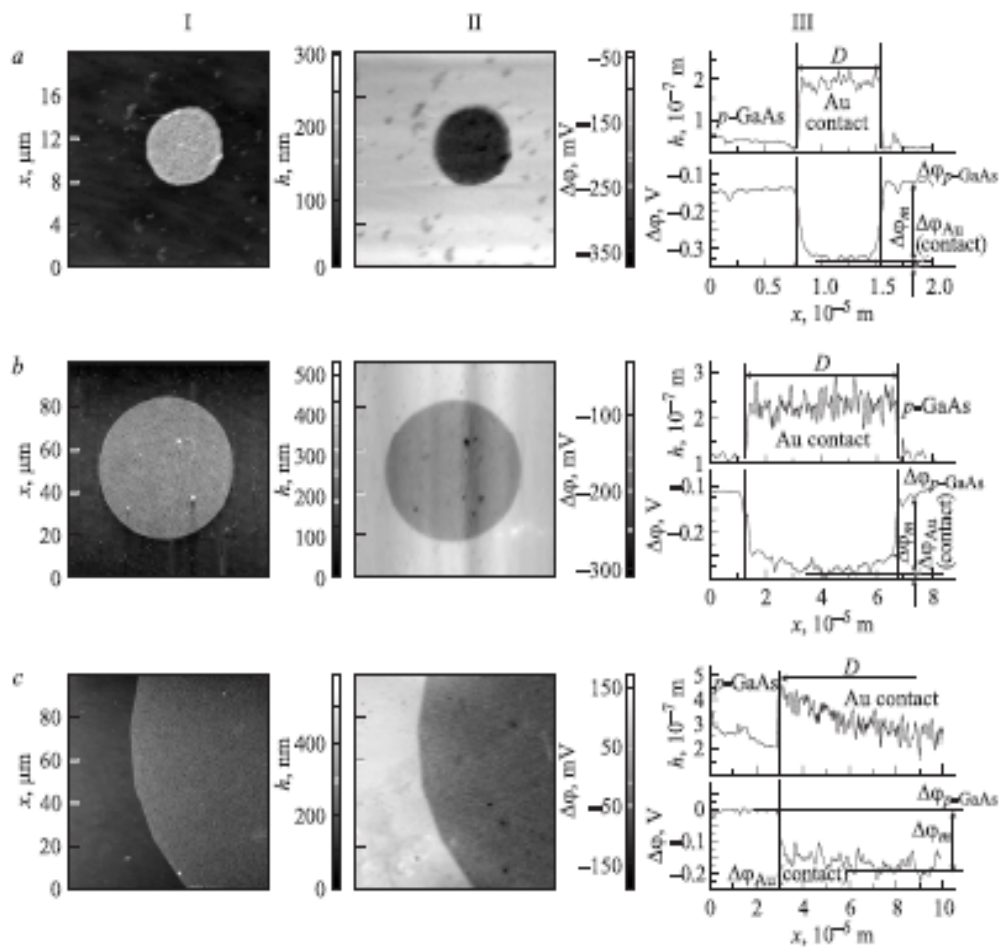
D, мкм	5	15	30	50
$d = 0,2$ мкм, $\varphi_{w2c}=4,902$ эВ, $\varphi_{Au}=5,124$ эВ				
$\Delta\varphi_m$ , эВ	0,25	0,26	0,19	0,01
$\Delta\varphi_s$ , эВ	0,48	0,51	0,49	0,51
$\Delta\varphi_{s-m}$ , эВ	0,23	0,25	0,30	0,50
$l$ , мкм	2	13	17	25
$\varphi_m$ , эВ	4,652	4,642	4,712	4,892
$\Delta\varphi_{Au - m}$ , эВ	0,572	0,482	0,412	0,232
$d = 0,075$ мкм, $\varphi_{w2c}=4,902$ эВ, $\varphi_{Au}=5,124$ эВ				
$\Delta\varphi_m$ , эВ	0,33	0,30	0,28	0,17
$\Delta\varphi_s$ , эВ	0,51	0,5	0,52	0,5
$\Delta\varphi_{s-m}$ , эВ	0,18	0,20	0,24	0,33
$l$ , мкм	1,5	3	7	8
$\varphi_m$ , эВ	4,572	4,602	4,622	4,732
$\varphi_{Au} - \varphi_m$ , эВ	0,552	0,522	0,502	0,392

### Исследование АСМ методами особенностей ДЭП КМП с различными диаметрами в зависимости от типа проводимости полупроводника

АСМ измерения диодов Шоттки с диаметрами 5, 15, 30, 50, 100, 200 и 500 мкм изготовленных на основе контакта металла Au толщиной 0,2 мкм с полупроводником как n - типа, так и p-типа эпитаксиального GaAs проводились в [8]. АСМ изображения пространственного рельефа, фазового контраста и КРП между зондом W<sub>2</sub>C кантливера и поверхностью диодов Шоттки на основе n – типа GaAs аналогичны АСМ изображениям, представленным как на рис.2. Однако, для p – типа GaAs, вокруг периметров контактов под действием ДЭП образуется осесимметричная протяженная область (ореол) значительно узкой шириной  $l$  с КРП отличной от КРП свободной поверхности nGaAs ( $N_A=5.10^{18} \text{ см}^{-3}$ ). На рис. 3 представлены АСМ изображения пространственного рельефа (I), контактной разности потенциалов (II) с соответствующими профилями поперечных сечений (III) участков поверхности p – типа GaAs, содержащих золотые контакты с барьером Шоттки диаметрами 5 (a), 50 (b) и 500 мкм (c).

Для Au -nGaAs и Au -pGaAs с толщиной металла 0,2 мкм результаты АСМ измерений КРП контакта  $\Delta\phi_m$  (где,  $\Delta\phi_m = \phi_{W_2C} - \phi_m$ ) и свободной поверхности полупроводника  $\Delta\phi_s$  (где,  $\Delta\phi_m = \phi_{W_2C} - \phi_s$ ), изменения потенциала  $\Delta\phi$  (где,  $\Delta\phi = \Delta\phi_s - \Delta\phi_m$ ), ширины ореола  $l$  ДЭП, работы выхода контактного металла  $\phi_m$  для эпитаксиального Au-nGaAs (100) диода Шоттки с различными (5 - 500 мкм) диаметрами  $D$ , а также изменение работы выхода контакта под действием ДЭП  $\Delta\phi_{Au-m}$  (где  $\Delta\phi_{Au-m} = \phi_{Au} - \phi_m$ ) относительно работе выхода сплошной пленки золото  $\phi_{Au}$  на поверхности p<sup>+</sup>GaAs приведены в таблице 2.

Из таблицы 2 видно, что для Au –nGaAs, с увеличением диаметров КМП от 5 до 500 мкм происходит увеличение ширины ореола  $l$  от 4 до 26 мкм и величина  $\Delta\phi_{s-m}$  от 0,10 до 0,62 эВ. В тоже время, под действием ДЭП работы выхода контактов уменьшаются на величину  $\Delta\phi_{Au-m}$  относительно работе выхода сплошной пленки золото  $\phi_{Au}$  на поверхности p<sup>+</sup>GaAs (где  $\phi_{Au}=5,124$  эВ). Для КМП с диаметром 5 мкм это уменьшение составляет 0,492 эВ, а для КМП с диаметром 500 мкм – составляет 0,092 эВ. Следует заметить, что для эпитаксиального Au – nGaAs контакта с диаметром больше 100 мкм влияние ДЭП заметно уменьшается. Для Au – pGaAs наблюдается узкая ширина ореола  $l$ . Для КМП с диаметром 5 мкм она имеет значение 2 мкм и с увеличением диаметров КМП от 30 до 500 мкм не происходит увеличение ширины ореола  $l$  и она имеет значение 4 мкм. Это означает, что в отличие от n-типа GaAs, для p-типа GaAs свободные положительные носители заряда под действием ДЭП образует обогащенные области (ореола) вокруг контактов с узкой шириной, слабо зависящей от кривизны края металла.



**Рис. 3.** Двумерные АСМ изображения рельефа (I), КРП (II) с соответствующими пространственных  $h(x)$  и потенциальных  $\Delta\phi(x)$  сечений (III) рельефов поверхности pGaAs(100) с расположенными на ней металла (Au) толщиной  $d \approx 0,2$  мкм с диаметрами D: a) 5 мкм; b) 50 мкм и c) 500 мкм.

**Таблица 2**

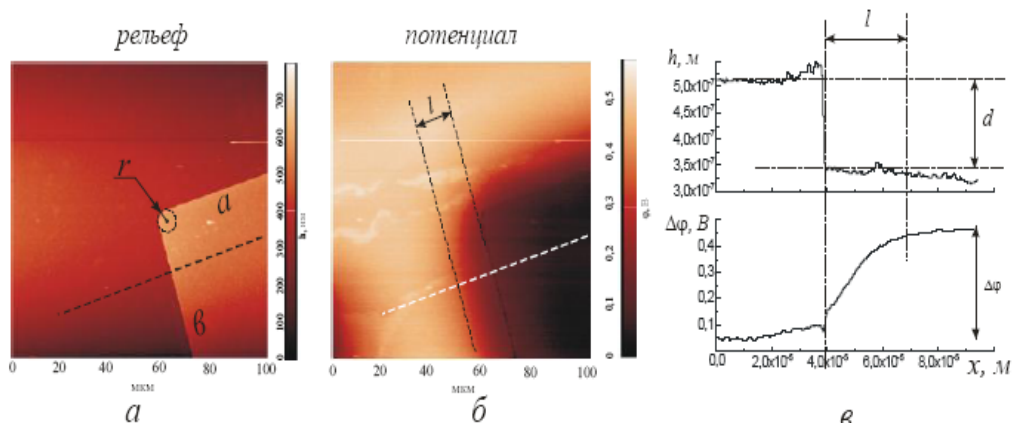
Численные значения АСМ измерений методом КРП Au-pGaAs и Au-nGaAs КМП структур с разными диаметрами (5 – 500 мкм)

D, мкм	5	15	30	50	100	200	500
Au-nGaAs, $d = 0,2$ мкм, $\varphi_{W2C} = 4,902$ эВ, $\varphi_{Au} = 5,124$ эВ							
$\Delta\phi_m, \text{эВ}$	0,270	0,230	0,170	- 0,030	- 0,070	- 0,120	- 0,130
$\Delta\phi_s, \text{эВ}$	0,370	0,375	0,430	0,420	0,490	0,480	0,490
$\Delta\phi_{s-m}, \text{эВ}$	0,100	0,145	0,260	0,450	0,560	0,600	0,620
$l, \text{мкм}$	4	12	16	20	23	24	26
$\varphi_m, \text{эВ}$	4,632	4,672	4,732	4,932	4,972	5,022	5,032

$\varphi_{Au} - \varphi_M, \text{эВ}$	0,492	0,452	0,392	0,192	0,152	0,102	0,092
Au-pGaAs, $d = 0,2 \text{ мкм}$ , $\varphi_{W2C} = 4,902 \text{ эВ}$ $\varphi_{Au} = 5,323 \text{ эВ}$							
$\Delta\varphi_M, \text{эВ}$	- 0,322	- 0,320	- 0,290	- 0,280	- 0,180	- 0,090	- 0,180
$\Delta\varphi_s, \text{эВ}$	- 0,126	- 0,150	- 0,130	- 0,130	- 0,040	0,040	0,000
$\Delta\varphi_{s-m}, \text{эВ}$	0,196	0,170	0,160	0,150	0,140	0,130	0,180
$l, \text{мкм}$	2	3	3,5	4	4	4	4
$\varphi_M, \text{эВ}$	5,224	5,222	5,192	5,182	5,082	4,992	5,082
$\varphi_{Au} - \varphi_M, \text{эВ}$	0,099	0,101	0,131	0,141	0,241	0,102	0,241

### Исследование АСМ методами особенностей ДЭП КМП в зависимости от геометрической конфигурации контакта

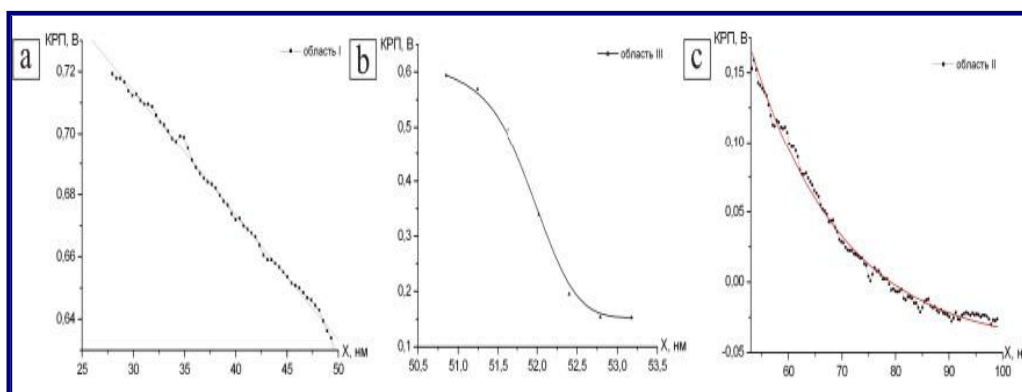
Результаты АСМ измерения поверхности эпитаксиальной nGaAs с прямоугольными золотыми контактами ( $100 \times 300 \text{ мкм}^2$ ) толщиной  $0,17 \text{ мкм}$  [9] представлены на рис.4. Ширина ореола ДЭП в этом случае достигает  $30 \text{ мкм}$  вдоль прямолинейного края металла благодаря большой площади контакта. Как отмечается в этой работе, эффект влияния ДЭП КМП на потенциал за его пределами настолько велик, что из-за наличия соседнего металлического контакта на расстоянии  $200 \text{ мкм}$  потенциал не выходит на уровень, соответствующий свободной поверхности. Следует заметить, что ореол вокруг углового закругления контакта существенно уже, чем в остальной области. Это согласуется с уменьшением ширины ореола по мере уменьшения диаметра контакта, т.е. ширины пространства поля ДЭП с увеличением кривизны краевой поверхности контакта, о чем говорилось выше.



**Рис.4.** Двумерные АСМ изображения рельефа (колонка “рельеф”), КРП (колонка “потенциал”) поверхности эпитаксиального nGaAs(100) с концентрацией носителей заряда  $N_D = 3 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$  с расположенными на ней прямоугольным  $100 \times 300 \text{ мкм}^2$  Au-контактом эпитаксиального n-GaAs(100) с концентрацией носителей заряда  $N_D = 3 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$  с расположенным на ней прямоугольным  $100 \times 300 \text{ мкм}^2$  Au-контактом толщиной  $d = 0,17 \text{ мкм}$  и соответствующими профилями пространственного  $h(x)$  и потенциального  $\Delta\varphi(x)$  рельефов по пунктирным линиям построений рельефов поверхностей.

### Исследование АСМ методами распределения потенциала ДЭП КМП на свободных поверхностях полупроводника и контактного металла

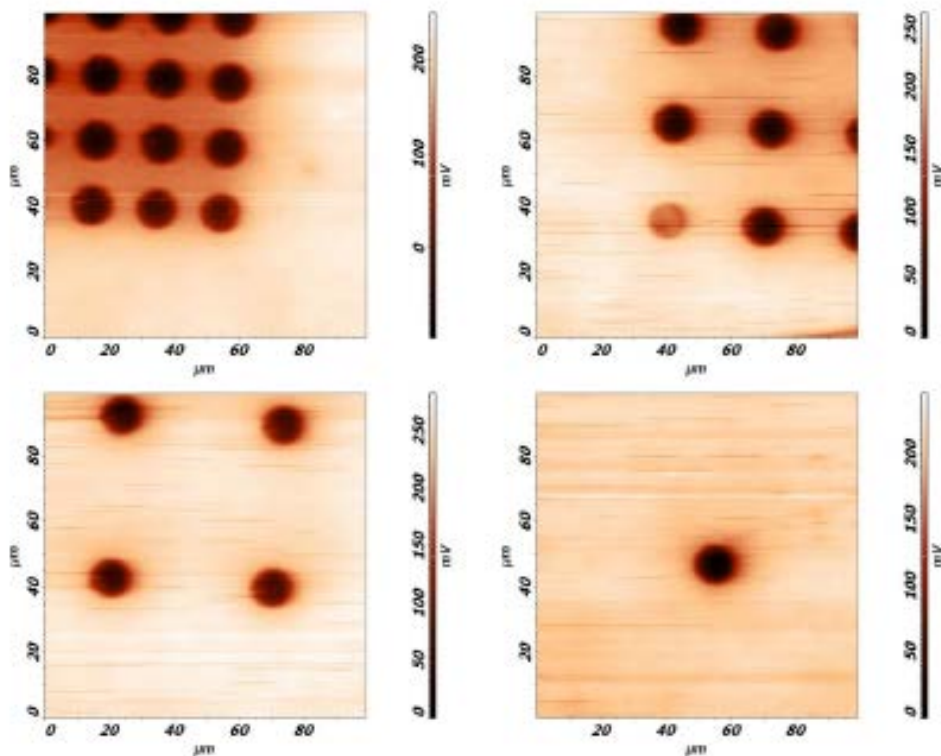
Для определения методом АСМ измерений закономерности распределения потенциала ДЭП на КМП были использованы [10] профили поперечных сечений КРП эпитаксиального Au - nGaAs(100) контакта с диаметром 200 мкм и толщиной металла 0,150 мкм, которые представлены на рис.5. Из рисунка видно, что части распределения потенциала ДЭП на ореоле с шириной около 25 мкм (рис.5,*a*), по периферии контакта на расстоянии около 2 мкм (рис.5,*b*) и на поверхности контакта на расстоянии около 50 мкм (рис.5,*c*) заметно отличаются друг от друга. Видно, что величина КРП от свободной поверхности к краю контакта в области ореола линейно уменьшается. Длина линейного участка профиля КРП составляет 22,5 мкм. На данном участке величина поверхностного потенциала изменяется на 90 мВ. А на поверхности металла величина КРП от края контакта к центру на расстоянии около 50 мкм уменьшается почти экспоненциально. Между этими участками изменение величины КРП по периферии контакта на ширине около 2 мкм имеет вид, как это представлено на рис.5,*b*.



**Рис. 5.** Профили поперечных сечений КРП эпитаксиального Au - nGaAs(100) контакта с диаметром 200 мкм и толщиной металла 0,150 мкм: на ореоле с шириной около 25 мкм (*a*), по периферии контакта на расстоянии около 2 мкм (*b*) и на поверхности контакта на расстоянии около 50 мкм (*c*).

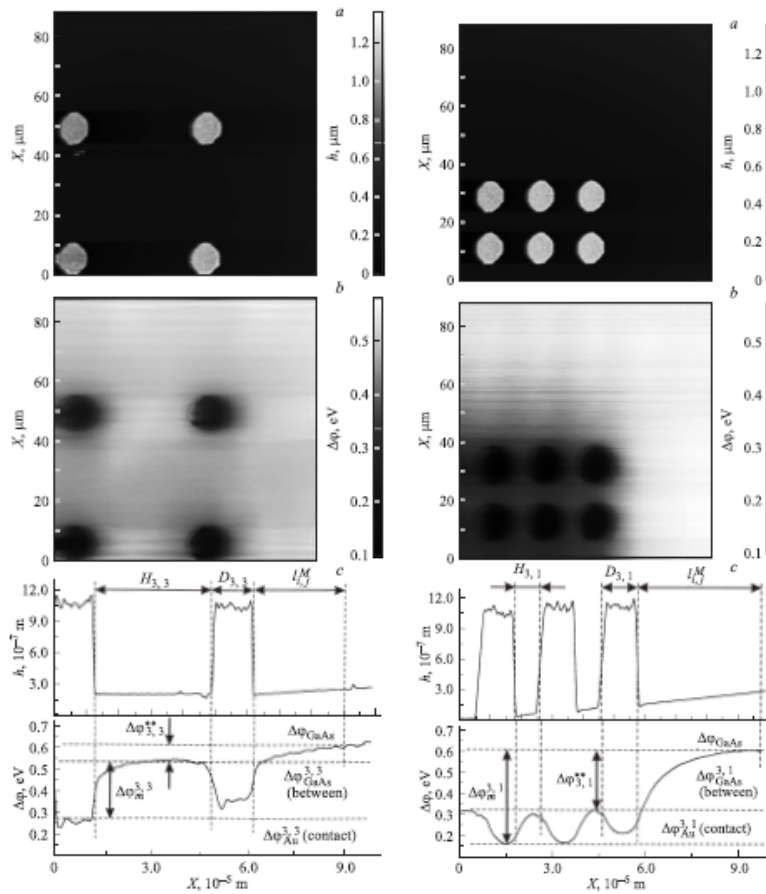
### Исследование АСМ методами особенностей взаимодействия ДЭП КМП в зависимости от расстояний между контактами

На рис. 6 представлены АСМ изображения Au - nGaAs(100) КМП с диаметром 10 мкм и толщиной металла 0,06 мкм при разной кратности расстояний между ними [10]. Видно, что при однократном расстоянии в области контактов наблюдается общее понижение величины КРП на поверхности полупроводника. При увеличении расстояния между контактами измеряемый поверхностный потенциал на поверхности nGaAs увеличивается и стремится к значению, соответствующему свободной поверхности.



**Рис. 6.** АСМ изображения КРП эпитаксиального Au - pGaAs(100) контактов с диаметром 10 мкм и толщиной металла 0,060 мкм при разной кратности расстояний между ними.

На рис.7 представлены АСМ изображения двух  $100 \times 100$  мкм<sup>2</sup> участков поверхности эпитаксиального pGaAs, содержащие единичные Au контакты диаметром 10 мкм матрицы четырехкратным (40 мкм) и однократным (10 мкм) расстоянием между контактами [11]. Из изображений рельефа (*a*) и КРП (*b*) с соответствующими профилями (*c*) пространственных  $h(x)$  и потенциальных  $\Delta\phi(x)$  поперечных сечений поверхностей видно, что уменьшение расстояния между контактами приводит к заметному понижению КРП (увеличению потенциалов) поверхностей контактов и КРП поверхности эпитаксиального pGaAs в интервалах между контактами. Дальнейшее уменьшение расстояния между контактами до 10 мкм приводит к понижению КРП единичных контактов и КРП полупроводниковой поверхности.

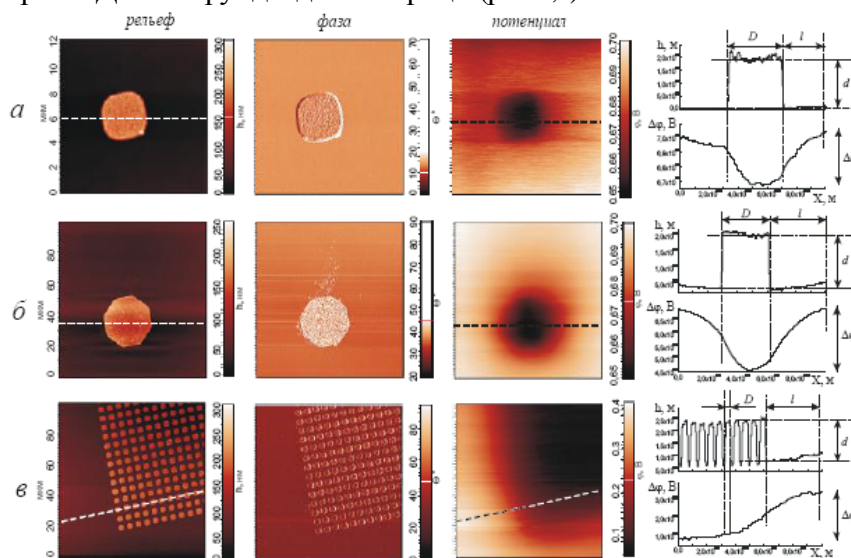


**Рис.7.** АСМ изображения двух  $100 \times 100 \text{ мкм}^2$  участков поверхности эпитаксиального nGaAs, содержащие единичные Au контакты диаметром 10 мкм матрицы четырехкратным (40 мкм) и однократным (10 мкм) расстоянием между контактами: (a) рельеф и (b) КРП с соответствующими профилями (c) пространственных  $h(x)$  и потенциальных  $\Delta\varphi(x)$  поперечных сечений поверхностей.

### Исследование АСМ методами особенностей ДЭП КМП в зависимости от природы и толщины металла

Для изучения особенности ДЭП в зависимости от природы и толщины металла проведено АСМ измерения КМП в [7] на основе контакта платина (Pt) с толщинами 0,2 мкм и 0,1 мкм, с полупроводником nGaAs с концентрацией легирующей примеси  $N_D = 6 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$ . Двумерные АСМ изображения рельефа (колонка “рельеф”), фазы (колонка “фаза”) и КРП (колонка “потенциал”) поверхности nGaAs(100) с расположенными на ней диодными матрицами, образованными металлом платина с диаметром 5 мкм (a) и 0,1 мкм (б) с соответствующими профилями продольных сечений пространственного  $h(x)$  и потенциального  $\Delta\varphi(x)$  рельефов по пунктирным линиям представлены на рис.8. Видно, что относительный

характер поведения величин  $\Delta\phi_m$ ,  $\Delta\phi_s$  и  $\Delta\phi_{s-m}$  в зависимости от диаметра и толщины металла, в целом, аналогичен характеру поведения этих же величин для Au – контакта. При этом абсолютные значения ширины ореола  $l$  и  $\Delta\phi_{s-m}$  для платина Pt – контактов значительно превышают аналогичные значения для Au – контактов тех же размеров. Из АСМ изображения рельефа и потенциала поверхности со своими профилями поперечных сечений диодной матрицы хорошо видно, что для Pt – контактов потенциал ДЭП на ореолах также обладает свойствами аддитивности. В результате сложения действие потенциала в каждой точке поверхности, содержащей барьерные контакты, усиливается. Это приводит к более сильному понижению КРП поверхности контактов и значительному увеличению ширины ореола ДЭП вокруг диодной матрицы (рис.8,в)



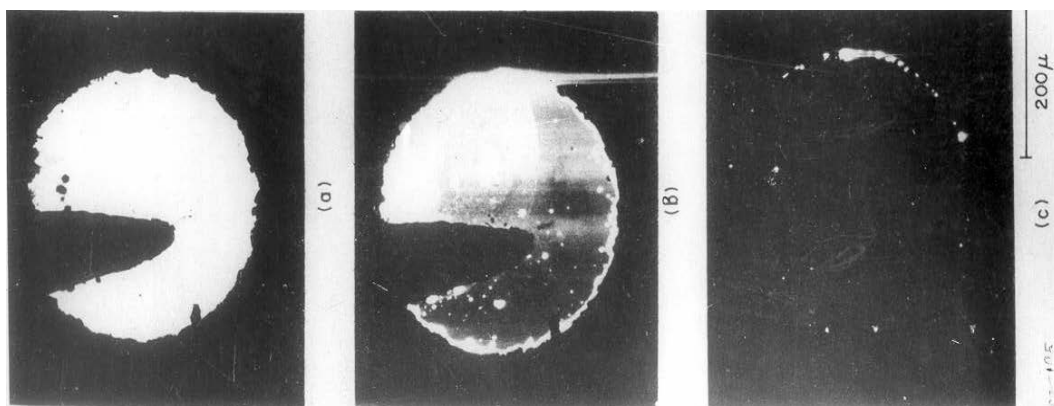
**Рис.8.** Двумерные АСМ изображения рельефа (колонка “*рельеф*”), фазы (колонка “*фаза*”) и КРП (колонка “*потенциал*”) поверхности nGaAs(100) с концентрацией носителей заряда  $N_D=6 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$  с расположенными на ней диодными матрицами (в), образованными металлом платина (Pt) с диаметром 5 мкм и толщинами 0,2 мкм (а) и 0,1 мкм (б) с соответствующими профилями продольных сечений пространственного  $h(x)$  и потенциального  $\Delta\phi(x)$  рельефов.

### Исследование методом Сканирующей Электронной Микроскопии особенностей токопрохождения в КМП диодов с ДЭП

В ранее опубликованной работе [12] с помощью сканирующего электронного микроскопа и токов индуцированных электронным пучком (ЕВИС) были изучены особенности преждевременного пробоя в ДШ с планарной структурой и меза структурой, изготовленных нанесением пленки металла Pt на поверхность полупроводника с концентрацией доноров  $6 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3}$  GaAs и термически обработанных до  $350^\circ\text{C}$  в течение времени от 1,5 до 216 часов. Энергия электронного пучка

менялась в интервале 5-30 кэВ. Результаты исследования ДШ с планарной и меза структурой были почти идентичными.

Типичные картинки распределения плотности обратного тока вдоль поверхности контакта планарного ДШ при обратных смещениях -1; -5 и -15 В представлены на рис.9.



**Рис.9.** Распределение плотности тока вдоль контактной поверхности Pt - nGaAs диод Шоттки при обратном смещении ( $U < 0$ ): *a*) -1 В, *b*) - 5 В и *c*) -15 В.

Как видно из рис.9,*a*, при напряжении -1 В, плотность обратного тока приблизительно равномерно распределяется по контактной поверхности и в то же время, существует отдельные участки, через которые токи практически не протекают. Это означает, что в этих точках ДЭП пятен все еще не компенсировано с внешним полем [6]. При относительно большом напряжении -5 В (рис.9,*b*) наблюдается множество отдельных светящихся участков и по периферии контакта светящее кольцо, через которые протекают токи с большой плотностью. Это показывает, что при этом ДЭП контакта как только полностью компенсируется внешним напряжением и начинает токопрохождение в темных участках. При обратном напряжении -15 В (рис.9,*c*) отдельные участки с большой плотностью тока, т.е. светящие участки на более низком фоне общего контакта, в основном, наблюдаются по периферии контакта. При этом уже отсутствует влияния ДЭП. Когда накладываются рис.9,*a*, *b* и *c* друг на друга, обнаруживается, что белые участки на рис.9,*c* совпадают с белыми участками на рис.10,*в*, распределенными вдоль поверхности, в том числе по периферии контакта. А отдельные белые участки и неравномерное белое кольцо вокруг контакта на рис.9,*в* совпадают с отдельными черными участками и черной периферийной областью на рис.9,*a*. Это экспериментально хорошо демонстрирует роли ДЭП в токопрохождении в диодах Шоттки.

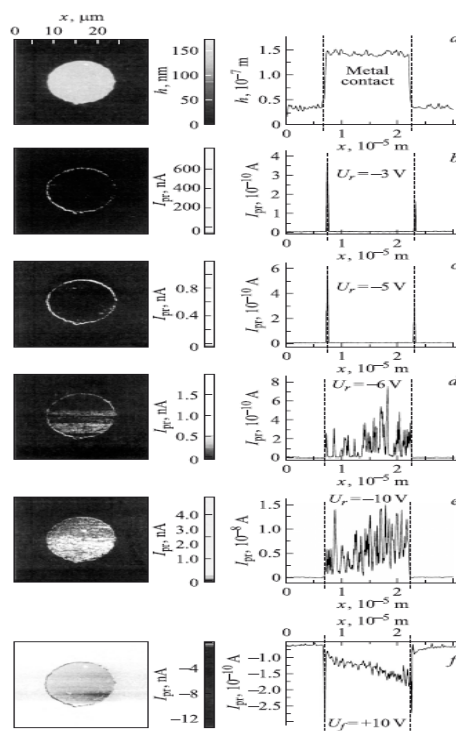
Под действием термической обработки распределение участков контакта, через которые протекают токи преждевременного пробоя существенно меняется. Некоторые из них исчезают, а некоторые появляются

заново. Такой характер распределения локальных участков преждевременного пробоя ДШ меняется от образца к образцу. Это означает, что при этом происходит изменение степени неоднородности границы раздела и, следовательно, степени влияния ДЭП КМП.

### Исследование АСМ методами особенностей токопрохождения в КМП диодов с ДЭП

Влияние ДЭП на характер токопрохождения в КМП изучено АСМ – методами в работе [13]. При этом измерено токопрохождение в прямом и обратном направлениях в эпитаксиальных Au - nGaAs КМП диодах с диаметром 15 мкм (рис. 10,а). Полученные двумерные контрастные АСМ изображения распределение токов растекания контакта при смещениях от - 10 В до +10 В с соответствующими профилями поперечных сечений представлены на рис.10.

Из рис.10 видно, что в обратном направлении, где напряженности ДЭП и внешнего поля в приконтактной области КМП становится противоположными [6], в периферийной области контакта ток начинает проходить при напряжении – 3В, как это наблюдается еще на рис.9.б. При этом ДЭП КМП компенсируется внешним напряжением.



**Рис.10** Двумерное АСМ изображения рельефа и токов растекания со своими профилями поперечных сечений контакта Au - nGaAs диода Шоттки с диаметром 15 мкм и толщиной металла 0,1 мкм.

Согласно рис.10b,c, по мере увеличения обратного напряжения до - 5В амплитуда периферийных токов растет. На это указывает увеличивающаяся яркость периферийной области контрастного изображения и увеличивающаяся амплитуда токов растекания периферийной области на поперечных профилях (рис.10, b,c). Ширина высокопроводящей периферийной области имеет значение  $< 0,3$  мкм и практически не изменяется при изменении приложенного напряжения. При обратных напряжениях  $> 6В$  токи через основную область становятся заметными (рис.10, d, e). По мере увеличения обратного напряжения амплитуда токов растекания через локально проводящие участки основной площади контакта увеличивается и становится равной амплитуде токов растекания по периферии контакта (или даже превышает ее). Степень локализации таких участков в среднем составляет 100-200 нм и, соизмеримо с размером зерен, образующих структуру золотого контакта. При обратных напряжениях  $> 6В$  ДЭП полностью компенсируется внешним напряжением и вся поверхность контакта становится проводящей и дальнейшее увеличение обратного напряжения приводит к одновременному росту токов растекания как по периферии, так и по основной площади контакта.

При прямом направлении напряженности ДЭП и внешнего поля в приконтактной области КМП становится параллельными и следовательно, распределение тока растекания в зависимости от приложенного напряжения изменяет свой характер [6] и становится так, как это представлено на рис.10f. Увеличение прямого напряжения не приводит к относительному изменению периферийных токов.

#### **Особенности токопрохождения в КМП диодов с ДЭП в зависимости от диаметров контактов и температуры**

Из вышеизложенного следует, что степень влияния ДЭП как на поверхностные потенциалы КМП, так и на электронные процессы в приконтактной области полупроводника (т.е. на приборные характеристики КМП) определяется с конфигурацией контакта и его геометрическими размерами. Как показало АСМ измерения ДЭП КМП (рис.2 – рис.8), реальные КМП в зависимости от степени влияния ДЭП делятся на две группы. К первой группе относятся КМП с широкой контактной поверхностью линейными геометрическими размерами больше  $\sim 100$  мкм, где ДЭП в основном охватывает краевые области контакта. А к второй группе относятся КМП с узкой контактной поверхностью линейными геометрическими размерами меньше  $\sim 100$  мкм, где ДЭП охватывает как полную свободную поверхность металлического контакта, так и полную приконтактную область полупроводника.

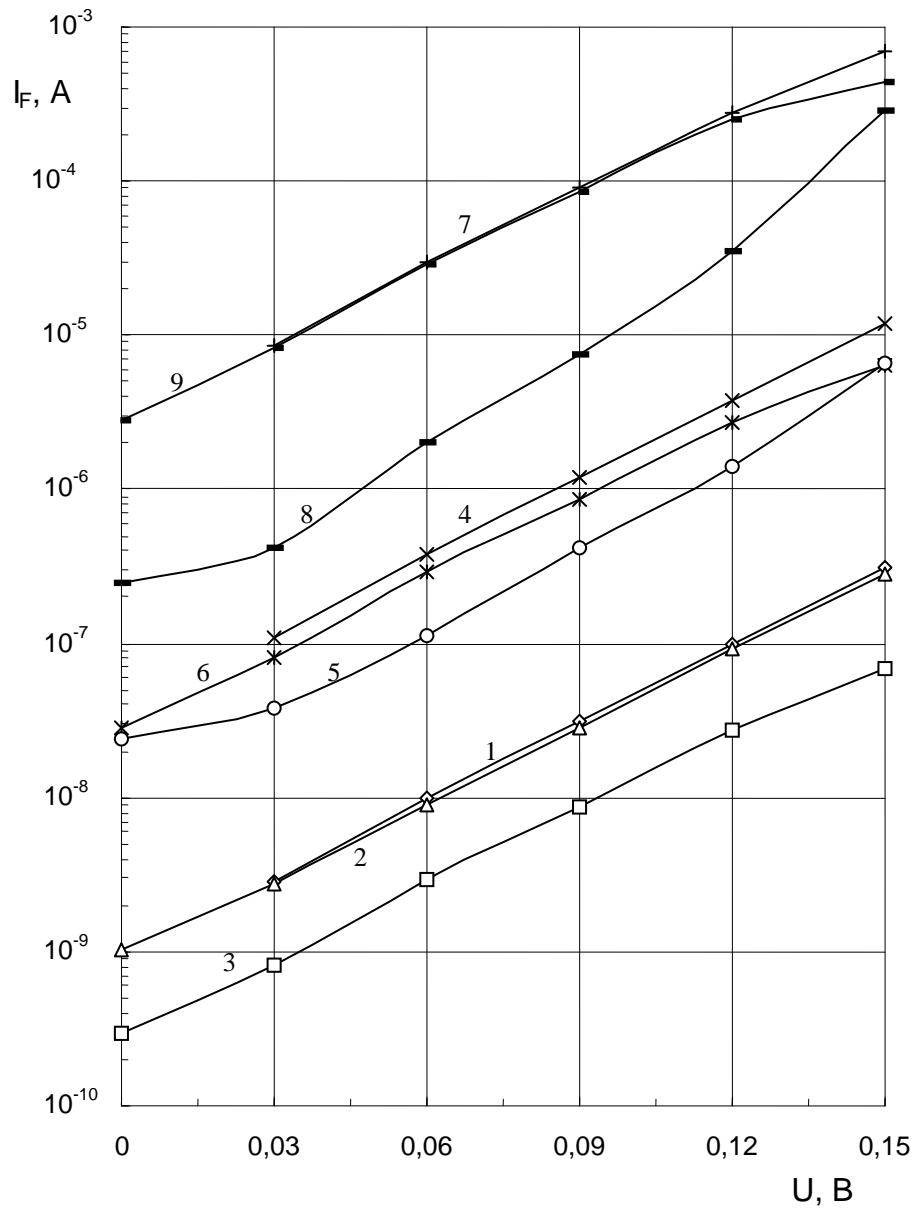
В работе [14] изучены электрофизические процессы в идентичных Cr-nSi диодах Шоттки, отличающихся лишь геометрическими размерами, т.е. степенью влияния ДЭП. Структуры ДШ на основе контакта хрома с кремнием *n*-типа изготавливались методом стандартной фотолитографии. На планарной поверхности с кристаллографической ориентацией (111) кремниевой пластины с удельным сопротивлением 1 Ом см выращивался тонкий диэлектрический слой SiO<sub>2</sub> с толщиной порядка 0,3 мкм. В слое SiO<sub>2</sub> вскрывались окна с различными диаметрами (6,

10, 20, 60, 100, 200, 500, 1000 мкм). Пленки хрома с толщиной 0,5 мкм получены термическим испарением в вакууме  $10^4$  Па на поверхности Si на окнах SiO<sub>2</sub>. С помощью разработанных специальных методов в [6] были определены периферийные токи  $I_{LS}$ , протекающие через периферийный участок контактной поверхности и токи  $I_S$ , протекающие через контактную поверхность ДШ без влияния ДЭП. При этом были использованы усредненные линейные плотности  $j_L$  периферийных токов  $I_L$ , обусловленных лишь влиянием ДЭП ДШ.

Типичные прямые ветви ВАХ Cr-nSi ДШ с диаметрами 10 мкм, 100 мкм и 1000 мкм, где напряженности ДЭП и внешнего поля в приконтактной области КМП становятся параллельными [6], представлены на рис.11, кривые 1, 4 и 7, соответственно. Видно, что экспериментально наблюдаемые прямые ветви ВАХ ДШ описываются теорией термоэлектронной эмиссии. На этом же рисунке также представлены зависимости как  $I_{LS}$  от  $U$  (кривые 2, 5 и 8, соответственно), так и  $I_S$  от  $U$  (кривые 3, 6 и 9, соответственно) для ДШ с диаметрами 10 мкм, 100 мкм и 1000 мкм. Видно, что зависимости как  $I_S$ , так и  $I_{LS}$  от  $U$  определяются механизмом термоэлектронной эмиссии. При этом зависимость  $I_S$  от  $U$  в полулогарифмическом масштабе имеет линейный характер, а зависимость  $I_{LS}$  от  $U$  имеет нелинейный характер. Получено, что на периферийной контактной площади  $S_L$  с шириной  $h_L$  ДШ высота барьера  $\Phi_{LS}$  становится ниже высоты барьера  $\Phi_{BS}$  на его остальной контактной площади. Ток  $I_F$ , протекающий через общую контактную поверхность ДШ, состоит из суммы токов  $I_{FL}$  и  $I_{FS}$ , протекающих через периферийную площадь  $S_L$  и площадь остальной части контакта  $S_S-S_L$ .

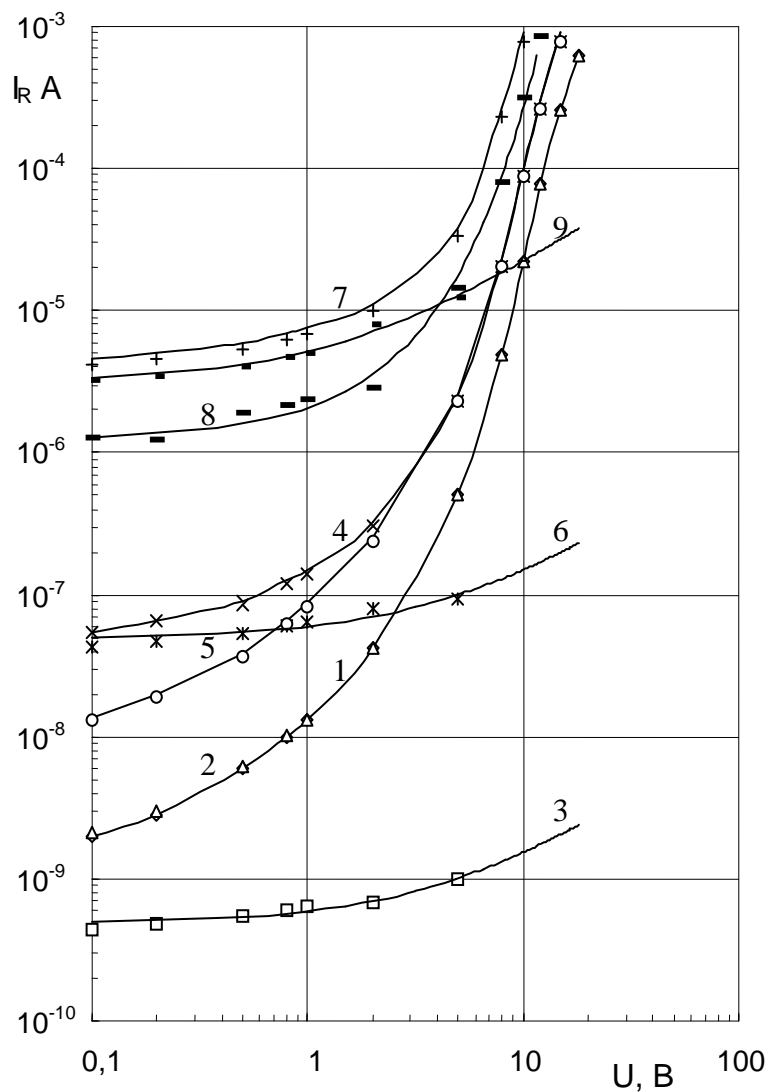
Типичные обратные ветви ВАХ Cr-nSi ДШ с диаметрами 10 мкм, 100 мкм и 1000 мкм, где напряженности ДЭП и внешнего поля в приконтактной области КМП становятся противоположными [6], представлены на рис.12 (кривые 1, 4 и 7, соответственно) в полулогарифмическом масштабе. Видно, что ВАХ ДШ изображаются двумя специфическими участками: первый начальный участок охватывает интервал напряжения  $U$  от 0 до около 2 В, а последующий второй участок охватывает интервал напряжения  $U$  от 2 В до напряжения пробоя.

Ток  $I_{R1}$  первого участка обратной ветви ВАХ медленно увеличивается с ростом  $U$ , и эта зависимость ослабевает с увеличением диаметра контакта. Между  $I_{R1}$  и  $U$  не наблюдается определенной корреляции. Однако между током  $I_{R2}$  второго участка обратной ветви ВАХ и  $U$  существует определенная корреляция, т.е. с ростом  $U$  ток  $I_{R2}$  экспоненциально увеличивается. При экстраполяции прямых линий к оси ордината на рис.12 для ДШ с различными диаметрами становится ясным, что ток  $I_2$  начинает протекать через контакт лишь после приложения напряжения на величину около 2 В, как это происходило на рис.9 и рис.10.



**Рис.11.** Прямые ветви ВАХ  $Cr - nSi$  диодов Шоттки с диаметрами 10 мкм, 100 мкм и 1000 мкм: токи общего контакта  $I_F$  (кривые 1, 4 и 7, соответственно), периферийные токи  $I_{LS}$  (кривые 2, 5 и 8, соответственно), токи общего контакта без влияния периферийных эффектов  $I_S$  (кривые 3, 6 и 9, соответственно).

Зависимости  $I_{LSI}$  от  $U$  для ДШ с диаметрами 10 мкм, 100 мкм и 1000 мкм представлены на рис.13 (кривые 2, 5 и 8, соответственно). На этом же рисунке представлены также зависимости  $I_{SI}$  от  $U$  (кривые 3, 6 и 9, соответственно).



**Рис.12.** Обратные ветви ВАХ  $Cr - nSi$  диодов Шоттки с диаметрами 10 мкм, 100 мкм и 1000 мкм: токи общего контакта  $I_T$  (кривые 1,4 и 7, соответственно), периферийные токи  $I_{LS}$  (кривые 2,5 и 8, соответственно), токи общего контакта без влияния периферийных эффектов  $I_S$  (кривые 3, 6 и 9, соответственно).

Видно, что зависимости как  $I_{SI}$ , так и  $I_{LSI}$  от  $U$  определяются механизмом термоэлектронной эмиссии. При этом зависимость  $I_S$  от  $U$  в полулогарифмическом масштабе имеет линейный характер, а зависимость  $I_{LS}$  от  $U$  имеет нелинейный характер. Используя из значений  $I_{LSI}$  и  $I_{SI}$  при  $U=0,1 В$ , методом ВАХ были определены высота потенциального барьера  $\Phi_{LS1}$ , безразмерный коэффициент  $n_{LI}$  (при  $U=1 В$ ) ДШ с различными диаметрами для периферийного участка и для общей контактной поверхности без влияния ДЭП ( $\Phi_{BS1}$ ,  $n_{SI}$ , соответственно). Из рис.12 (кривые 1, 4 и 7) видно, что второй участок обратной ветви ВАХ ДШ состоит в основном из тока, протекающего по периферии контакта и в полулогарифмическом масштабе изображается прямой линией. Экстраполируя прямых линий к оси ордината на рис.12 были определены токи насыщения  $I_{L2}(0)$  ДШ с различными диаметрами.

Таким образом, экспериментальное исследование токопрохождения в Cr-nSi ДШ с ДЭП показало:

- общая контактная поверхность ДШ с ДЭП состоит из двух областей (периферийной с шириной несколько микрометров и относительно внутренней), на которых высота потенциального барьера отличается около 40 мэВ и с уменьшением диаметра контакта от 1000 мкм до 6 мкм вклад периферийного тока в ток общего контакта увеличивается до около 100 % для прямой и начальной обратной ветвей ВАХ;

- высота потенциального барьера, коэффициент идеальности (безразмерный коэффициент), контактное сопротивление, площадь и ширина периферийной контактной поверхности, вклад периферийного тока в ток общего контакта для прямой ветви и начальной обратной ветви ВАХ ДШ с ДЭП имеют соответствующие близкие значения;

- за первым начальным участком обратной ветви ВАХ ДШ с ДЭП следует ее второй участок, который проявляется после приложения определенного критического напряжения и состоит лишь из периферийного тока, для которого высота потенциального барьера, безразмерный коэффициент, контактное сопротивление, площадь и ширина периферийной контактной поверхности отличаются от соответствующих параметров первого начального участка ВАХ;

ВАХ ДШ с ДЭП в целом, описывается формулой, полученной на основе теории термоэлектронной эмиссии с учетом ДЭП [6].

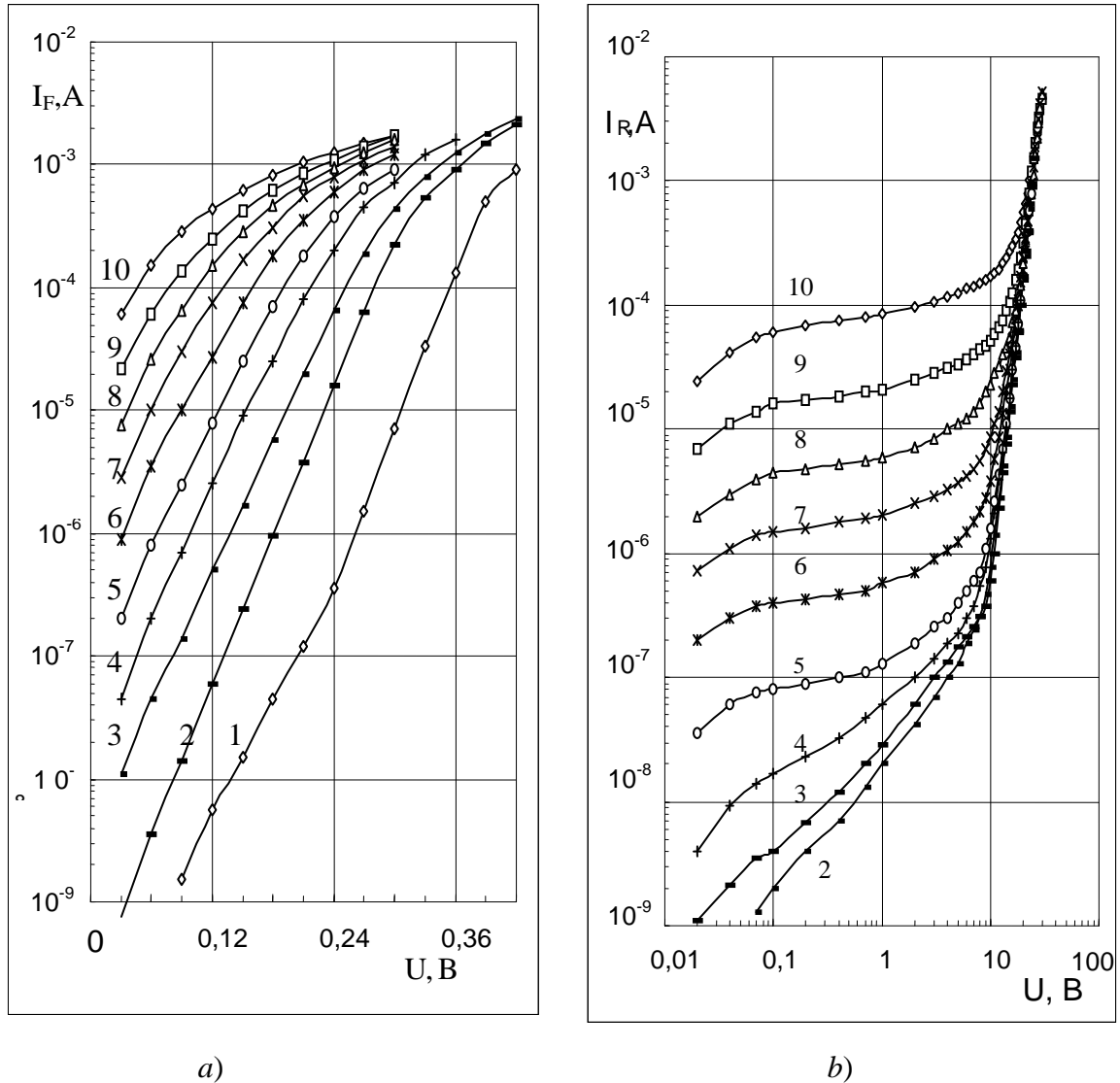
В работе [15] представлены результаты исследования температурной зависимости протекания общего тока в Ni-nSi ДШ с различными диаметрами (10 мкм – 1000 мкм), а результаты исследования температурных зависимостей протекания тока при отсутствии влияния ДЭП и периферийного тока в этих структурах ДШ представлены в последующих работах [16-18] и концентрационной зависимости токопрохождения в работе [19].

Исследование [15] температурной зависимости в интервале 132 К – 387К температур Ni-nSi ДШ с различной степени влияния ДЭП показало, что удовлетворительный вид ВАХ ДШ с ДЭП сохраняется в ограниченных интервалах температур. Особенности температурной зависимости высоты барьера, коэффициента идеальности, контактного сопротивления, безразмерного коэффициента и других параметров ДШ с ДЭП зависит от выбранного интервала температур и от геометрических размеров контакта, т.е. от степени влияния ДЭП.

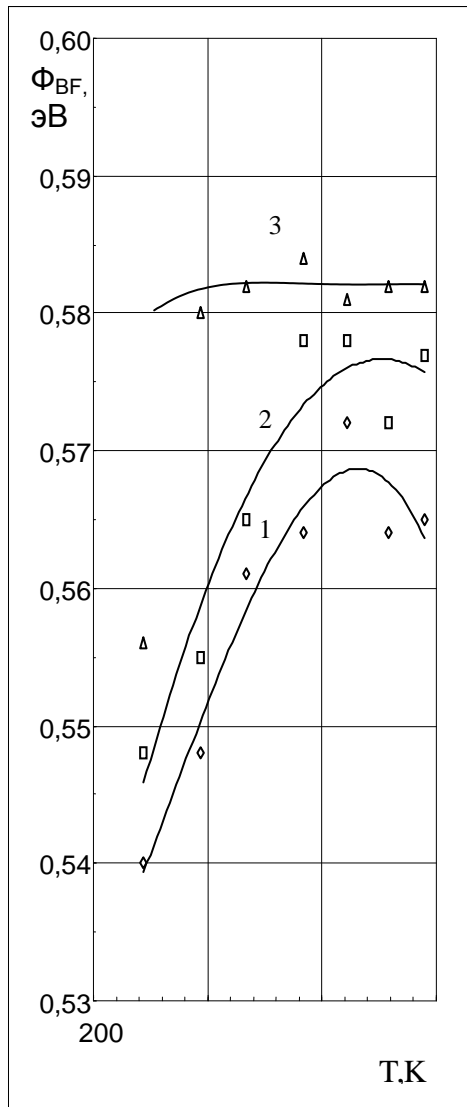
При комнатной температуре прямые ветви ВАХ ДШ с различными диаметрами, т.е. с различной степени влияния ДЭП, где изображаются прямыми линиями в полулогарифмическом масштабе, а начальные участки обратных ветвей ВАХ описывают медленное возрастание обратных токов с ростом напряжения. При достаточно больших напряжениях, намного ниже теоретического значения напряжения пробоя 100 В, происходит резкое возрастание обратных токов ДШ с ДЭП. Эти особенности ВАХ соблюдаются в ограниченных интервалах температур. Линейность прямой ветви ВАХ сохраняется в интервале температур 222К –363 К, а традиционный вид начальных участков обратных ветвей ВАХ - в 267 К – 387 К. При относительно высоких температурах прямые ветви ВАХ приобретают нелинейный характер, а при относительно низких температурах прямые ветви ВАХ деградируют, и появляются избыточные токи при низких напряжениях, а начальные участки обратных ветвей ВАХ приобретают почти омический характер. Типичные температурные зависимости прямых и обратных ветвей ВАХ ДШ с диаметрами 100 мкм в интервале температур 185 К - 387 К представлены на рис. 13, *a* и *b*, соответственно.

Из прямых ветвей и начальных участков обратных ветвей ВАХ ДШ с различными диаметрами были определены высоты барьеров  $\Phi_{BF}$  и  $\Phi_{BR}$  в широком интервале температур. Их температурные зависимости для ДШ с диаметрами 10 мкм, 100 мкм и 1000 мкм представлены на рис.14,*a* и *b*. Как видно из рисунков, характер температурной зависимости высоты барьера ДШ зависит как от геометрических размеров выпрямляющего контакта, т.е. от степени влияния ДЭП, так и от значений выбранного температурного интервала. Для ДШ с диаметром 10 мкм, т.е. с большой степени влияния ДЭП, высота барьера с ростом температуры, в интервале 222 К -311 К, увеличивается, а в интервале 311 К-387 К уменьшается. А для ДШ с диаметром 1000 мкм, т.е. с меньшей степени влияния ДЭП, высота барьера с ростом температуры, в интервале 247 К – 329 К, практически остается неизменной, а в интервале 329 К-387 К медленно уменьшается. Для ДШ с диаметрами больше 10 мкм и меньше 1000 мкм температурные зависимости высоты барьера характеризуются промежуточными состояниями между температурными зависимостями высоты барьера для ДШ с диаметрами 10 мкм и 1000 мкм, как это представле-

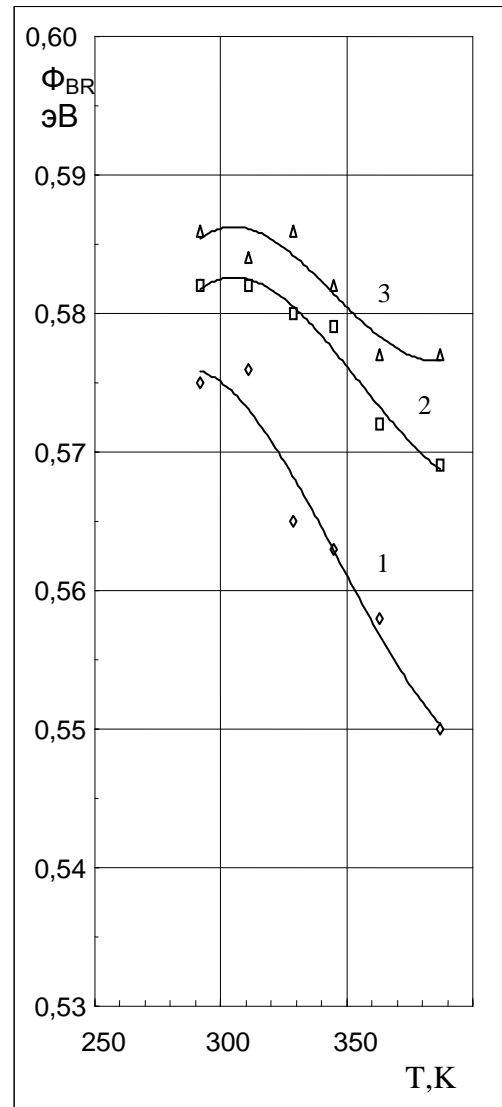
но на рисунках для ДШ с диаметром 100 мкм. Изменение знака термического коэффициента высоты барьера с ростом температуры, подтверждается значениями высот барьеров ДШ, определенных из зависимостей Ричардсона  $I_0/T^2$  от  $1/T$ .



**Рис.13.** Прямые (а) и обратные (б) ветви ВАХ Ni - nSi диодов Шоттки с диаметром 100 мкм при температурах Т (К): 1 – 185, 2 – 222, 3 – 247, 4 – 267, 5 – 292, 6 – 311, 7 – 329, 8 – 345, 9 – 363, 10 – 387.



a)



b)

**Рис.14.** Температурные зависимости высоты барьера Ni - nSi диодов Шоттки с диаметрами 10 мкм (1), 100 мкм (2) и 1000 мкм (3) для прямой (a) и обратной (b) ветви ВАХ.

Таким образом, следует отметить, что удовлетворительный вид ВАХ ДШ с ДЭП сохраняется в ограниченных интервалах температур, где верхний предел интервала ограничивается искривлением прямой ветви ВАХ в полулогарифмическом масштабе, а нижний предел интервала ограничивается появлением избыточного тока при низких напряжениях.

Характер температурной зависимости высоты барьера и коэффициента идеальности ДШ зависит от выбранного интервала температур и от степени влияния ДЭП, т.е. от геометрических размеров выпрямляющего контакта. При этом, в зависимости от температуры направления изменения высоты барьера и коэффициента идеальности становятся противоположными, т.е. низкому значению высоты барьера соответствует высокое значение коэффициента идеальности и, наоборот. Однако, экспоненциальный характер зависимости контактного сопротивления ДШ с ДЭП от температуры сохраняется во всем интервале температур, где ВАХ ДШ с ДЭП имеет удовлетворительный вид. Между экспериментальным значением постоянной Ричардсона и термическим коэффициентом высоты барьера ДШ с ДЭП существует экспоненциальная зависимость. С ростом напряжения возрастание обратного тока ДШ с ДЭП происходит сильнее, чем это следует из уменьшения высоты барьера под действием силы зеркального изображения.

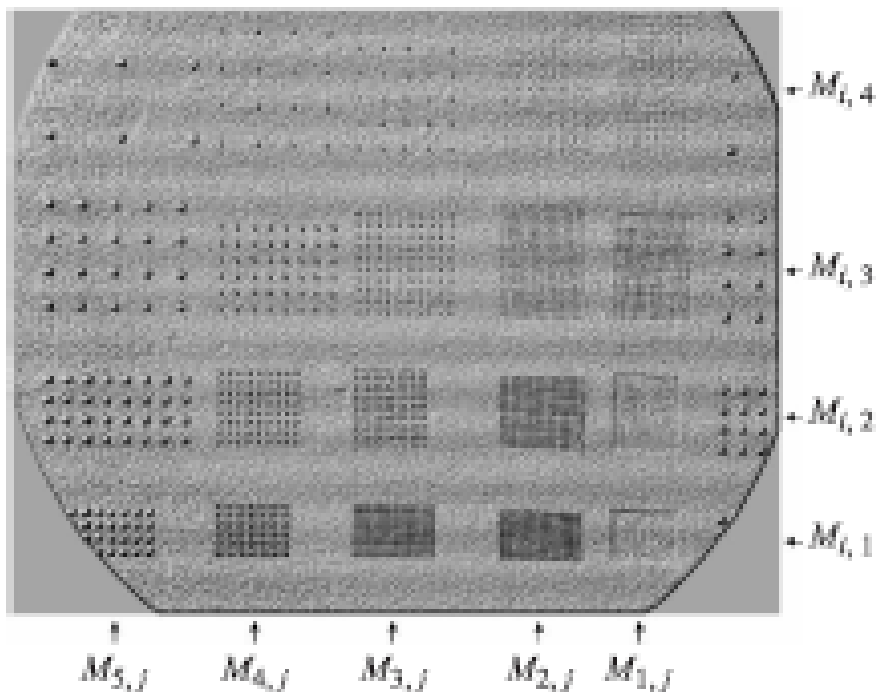
Экспериментальные результаты хорошо интерпретируются теорией термоэлектронной эмиссии с учетом ДЭП [6].

#### **Особенности токопрохождения в электрически взаимодействующих диодах Шоттки с ДЭП разными диаметрами**

Электрическое взаимодействие диодов Шоттки с ДЭП детально исследовано АСМ методами в [11]. При этом были изготовлены ДШ матрицы с учетом необходимому условию возникновения электрического взаимодействия между контактами, являющуюся наличием вокруг них распространяющегося на достаточно большие расстояния ( $< 30$  мкм) ореола ДЭП. В работе исследовались матрицы  $M_{ij}$  золотых с толщиной  $0,9$  мкм контактов ДШ с  $i$  диаметрами ( $D_{ij} = 3, 5, 10, 15$  и  $30$  мкм) и с  $j$  расстояниями между контактами ( $H_{ij} = 1 \times D_{i,1}, 2 \times D_{i,2}, 4 \times D_{i,3}, 10 \times D_{i,4}$ ), сформированных на поверхности эпитаксиального слоя  $n\text{GaAs}(100)$  с толщиной  $0,3$  мкм и концентрацией  $N_D = 4.5 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$ , как это представлено на рис.15.

На рис.16 представлены прямые и обратные ветви ВАХ в полулогарифмическом масштабе электрически не взаимодействующих ДШ с различными диаметрами ( $D_{i,4} = 3, 5, 10, 15$  и  $30$  мкм) диодных матриц  $M_{i,4}$  с десятикратным расстоянием  $H_{i,4} = 10 \times D_{i,4}$  между контактами. Получено, что с ростом диаметров контактов увеличивается действующая высота потенциального барьера и незначительно уменьшается коэффициент идеальности. Интервал изменения по току прямых ВАХ при уменьшении диаметра контактов от  $30$  мкм до  $3$  мкм для прямого смещения  $0,5$  В составлял 2 порядка, от  $10^{-5}$  до  $10^{-7}$  А. Напряжение пробоя ДШ

при обратном токе 10 мкА увеличивается с уменьшением диаметра контактов от 13 до 14,5 В.

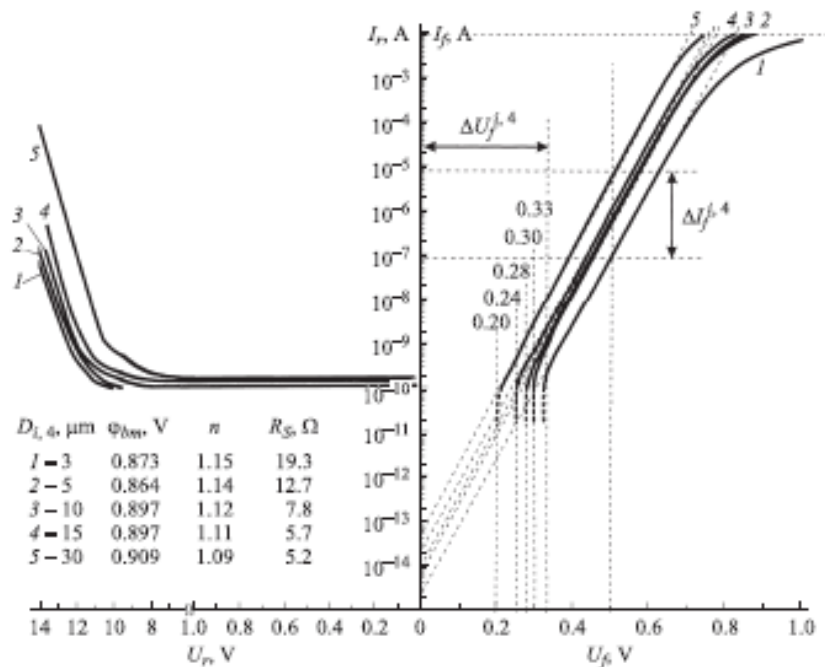


**Рис.15.** Фотография поверхности чипа эпитаксиального pGaAs с расположенными на ней матрицами  $M_{ij}$  (где,  $D_{ij}$  - диаметр контактов,  $H_{ij}$  - расстояние между контактами) золотых контактов ДШ. Целое число “i” нумерует диаметр контактов: 1 –  $D_{1j}$  – 3, 2 –  $D_{2j}$  – 5, 3 –  $D_{3j}$  – 10, 4 –  $D_{4j}$  – 15 и 5 –  $D_{5j}$  – 30 мкм. Целое число “j” нумерует расстояние между контактами: 1 –  $H_{i,1}=1 \times D_{i,1}$ , 2 –  $H_{i,2}=2 \times D_{i,2}$ , 3 –  $H_{i,3}=4 \times D_{i,3}$  и 4 –  $H_{i,4}=10 \times D_{i,4}$ .

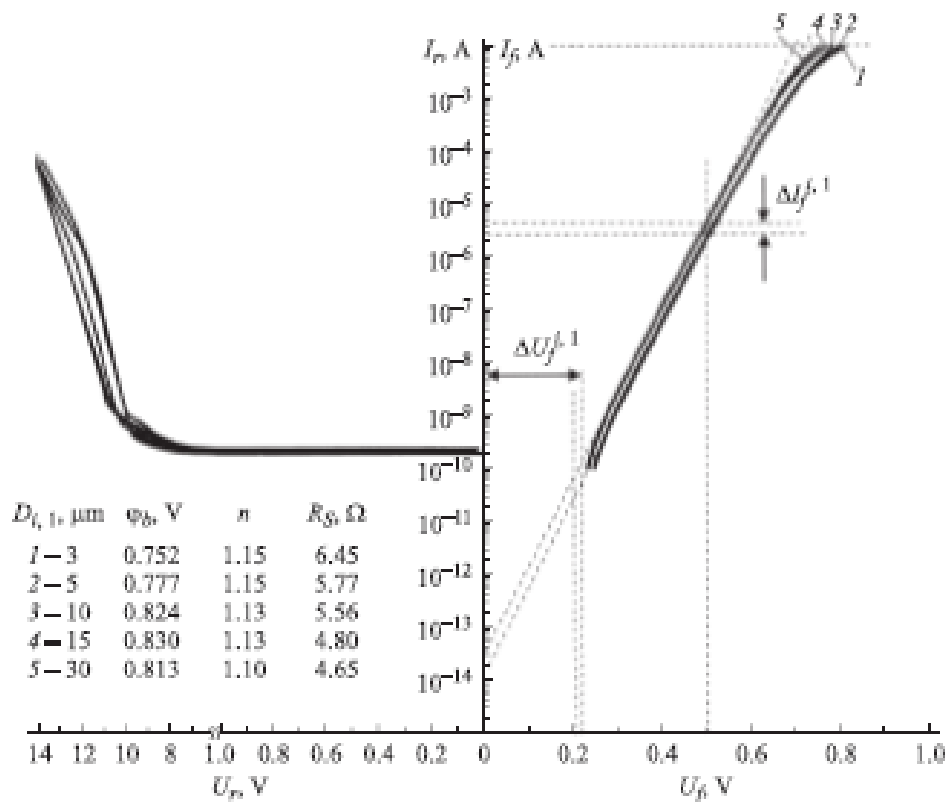
На рис.17 представлены прямые и обратные ветви ВАХ в полулогарифмическом масштабе электрически не взаимодействующих ДШ с различными диаметрами ( $D_{i,1} = 3, 5, 10, 15$  и 30 мкм) диодных матриц  $M_{i,1}$  с однократным расстоянием  $H_{i,1}=1 \times D_{i,1}$  между контактами. Получено, что уплотнение диодных матриц всех видов приводит к заметным изменениям в их ВАХ. В данном случае ВАХ ДШ с диаметрами 3, 5, 15 и 30 мкм приближаются к ВАХ ДШ с диаметром 10 мкм. Разброс по током при прямом смещении 0,5 В составлял всего на  $5 \cdot 10^{-6}$  А. При этом для ДШ с диаметрами меньше 10 мкм наблюдается уменьшение действующей высоты барьера. Для ДШ с диаметрами больше 10 мкм, наоборот, наблюдается увеличение действующей высоты барьера. Количественные отличия при качественном соответствии также наблюдаются и для обратных ветвей ВАХ ДШ уплотненных матриц.

Установлено, что электрическое влияние между собранными в диодную матрицу контактами ДШ появляется в значительном изменении их поверхностно-

го потенциала и статических вольтамперных характеристик. Показано, что изменение поверхностного потенциала и статических вольтамперных характеристик ДШ происходит под влиянием собственного ДЭП контакта, а также под влиянием ДЭП матрицы, образованного суперпозицией ДЭП образующих ее контактов. Степень такого влияния определяется расстоянием между контактами, а также полным суммарным зарядом областей пространственных зарядов всех контактов матрицы. Было установлено, что сближение контактов приводит к увеличению действующей высоты барьера и незначительному увеличению показателя идеальности. Увеличение суммарной площади контактов в матрице приводит к относительному понижению действующей высоты барьера и незначительному увеличению показателя идеальности.



**Рис.16.** Прямые и обратные ВАХ электрически не взаимодействующих Au-nGaAs ДШ с диаметрами  $D_{i,4}$ : 1- 3мкм, 2- 5 мкм, 3 – 10 мкм, 4 – 15 мкм и 5 – 30 мкм, принадлежащие матрицам  $M_{i,4}$  соответствующими десятикратным расстоянием  $H_{i,4}=10 \times D_{i,4}$  между ДШ.

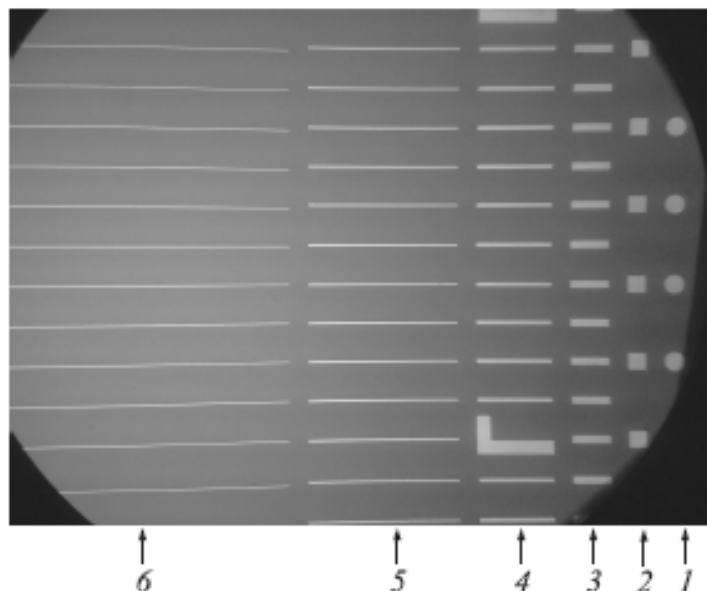


**Рис.17.** Прямые и обратные ВАХ электрически взаимодействующих Au-nGaAs ДШ с диаметрами  $D_{i,1}$ : 1- 3мкм, 2- 5 мкм, 3 – 10 мкм, 4 – 15 мкм и 5 – 30 мкм, принадлежащие матрицам  $M_{i,1}$  соответствующими однократным расстоянием  $N_{i,1} = 10 \times D_{i,1}$  межплв ЛПП

### Особенности фотопроводимости диодов Шоттки с ДЭП в зависимости от конфигурации контактов

Преобразование световой энергии в электрическую происходит в области пространственного заряда (ОПЗ) диода Шоттки в результате поглощения квантов света и генерации электронно-дырочных пар. Разделение зарядов (электронов и дырок) под действием электрического поля в ОПЗ контакта приводит к возникновению фотоэдс и появлению генерационного фототока. ДЭП в реальных ДШ проникает вглубь полупроводника и охватывает периферийную приконтактную область ОПЗ для широких контактов (рис.1,b,c) и полную приконтактную область ОПЗ для узких контактов. В работе [20] твердо установлено, что под действием ДЭП КМП происходит заметное изменение приборных характеристик и увеличение эффективности преобразования световой энергии в электрическую. При этом, исследовались Au-nGaAs ДШ одинаковой площади  $S_i$  (где,  $S_i = 7853,98 \text{ мкм}^2$ ) и

толщиной металла 0,1 мкм, но разной формы (рис.18), сформированные на поверхности эпитаксиального слоя nGaAs(100) с толщиной 10 мкм и концентрацией  $N_D=6,4 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-3}$ .



**Рис.18.** Оптическое изображение Au-nGaAs ДШ одинаковой площадью  $S_i = 7853,98 \text{ мкм}^2$  разными (*i*) формами: 1 – круглые диаметром 100 мкм, 2 – квадратные со сторонами 88,62 мкм, 3 – прямоугольные со сторонами 40x196,35 мкм, 4 – прямоугольные со сторонами 20x392,70 мкм, 5 – прямоугольные со сторонами 10x785,40 мкм, 6 – прямоугольные со сторонами 5x1570,80 мкм.

На рис.19 представлены прямые темновые (*a*) и соответствующие им световые (*b*) ВАХ диодов Шоттки 1- 6. Видно, что токи насыщения прямых темновых ВАХ контактов 1-6 имеют близкие значения. Определенные по ВАХ значения действующих высоты барьеров диодов 1-6 незначительно уменьшаются с увеличением периметра (табл.3).

**Таблица 3**

Геометрические размеры контактов 1-6 и их темновые(dark)приборные характеристики

Контакты	Размер Контакта (мкм)	P (мкм)	$I_{of}$ А	$\Phi_B$ эВ	n	$I_{of}$ А	$J_r = I_{of}/P$ А/мкм
1	D = 100	314,16	$3 \cdot 10^{-13}$	0925	1,05	$3 \cdot 10^{-8}$	$9,6 \cdot 10^{-11}$
2	88,62 x 88,62	354,49	$4,3 \cdot 10^{-13}$	0916	1,06	$4,5 \cdot 10^{-8}$	$12,7 \cdot 10^{-11}$
3	40 x 196,35	472,70	$5,2 \cdot 10^{-13}$	0911	1,06	$5,5 \cdot 10^{-8}$	$11,6 \cdot 10^{-11}$
4	20 x 392,70	825,40	$7,4 \cdot 10^{-13}$	0902	1,07	$8 \cdot 10^{-8}$	$9,7 \cdot 10^{-11}$
5	10 x 785,4	1590,80	$9 \cdot 10^{-13}$	0897	1,08	$1,5 \cdot 10^{-7}$	$9,4 \cdot 10^{-11}$
6	5 x 1570,8	3157,60	$1 \cdot 10^{-12}$	0894	1,09	$2,5 \cdot 10^{-7}$	$7,9 \cdot 10^{-11}$

Увеличение протяженности периметра более чем в 10 раз, приводит к увеличению обратного тока в 10 раз. Линейная плотность обратного тока контактов 1-6 при напряжении более 10 В имеет одинаковое значение. Это означает, что обратные токи контактов 1-6 состоят лишь из периферийных токов.

Освещение контактов приводит к незначительному уменьшению прямых токов насыщения, соответствующему увеличению действующей высоты барьера  $\Phi_B$  и уменьшению значений показателя идеальности  $n$  (табл.4). Для световых прямых ВАХ увеличение протяженности периметра  $P$  и в отличие от темновых приводит к дальнейшему увеличению действующей высоты барьера  $\Phi_B$  и уменьшению значения показателя идеальности (табл.4). Увеличение протяженности периметра более чем в 10 раз, приводит к увеличению значений фотоэдс более чем в 1,5 раза.

Таблица 4

Геометрические размеры контактов 1-6 и их световые (light) приборные характеристики

Контакты	Размер контакта (мкм)	P (мкм)	$I_{or}$ А	$\Phi_B$ эВ	$n$	$I_{or}$ А	$J_r = I_{or}/P$ А/см	$U^{ph}$ В
1	D = 100	314,16	$2,1 \cdot 10^{-13}$	0,934	1,03	$7 \cdot 10^{-8}$	$2,2 \cdot 10^{-10}$	0,24
2	88,62 x 88,62	354,49	$1,8 \cdot 10^{-13}$	0,939	1,03	$4,55 \cdot 10^{-7}$	$1,3 \cdot 10^{-9}$	0,28
3	40 x 196,35	472,70	$1,5 \cdot 10^{-13}$	0,943	1,02	$9,945 \cdot 10^{-7}$	$2,1 \cdot 10^{-9}$	0,31
4	20 x 392,70	825,40	$1 \cdot 10^{-13}$	0,953	1,01	$1,42 \cdot 10^{-6}$	$1,7 \cdot 10^{-9}$	0,31
5	10 x 785,4	1590,80	$9 \cdot 10^{-14}$	0,856	1,00	$2,85 \cdot 10^{-6}$	$1,8 \cdot 10^{-9}$	0,37
6	5 x 1570,8	3157,60	$8 \cdot 10^{-14}$	0,860	1,00	$4,75 \cdot 10^{-6}$	$1,5 \cdot 10^{-9}$	0,38

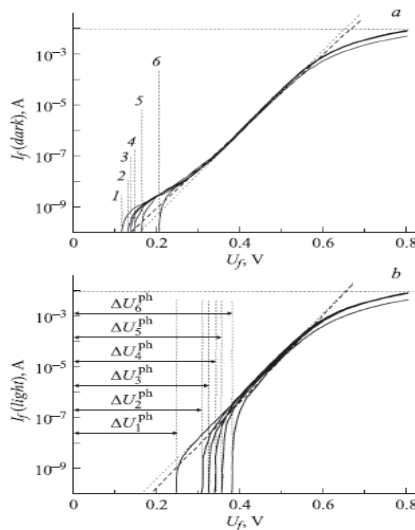
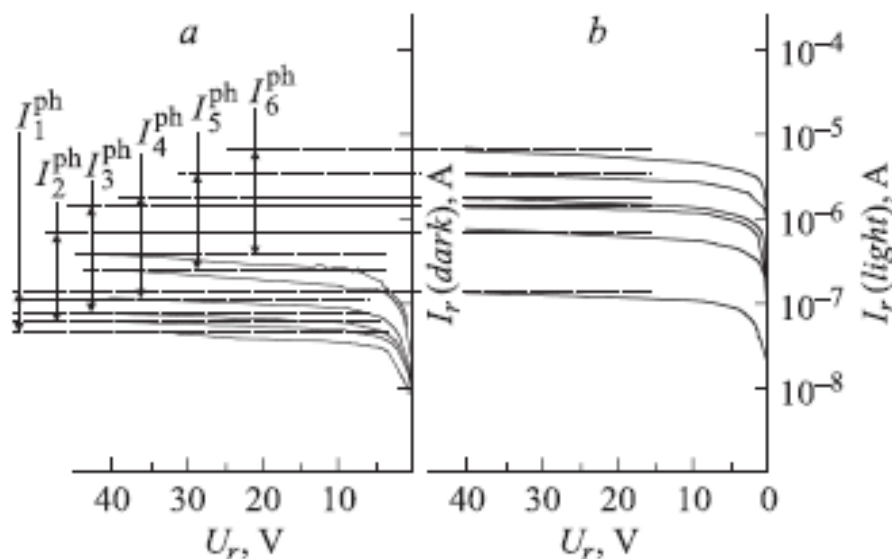


Рис.19. Прямые ветви вольтамперных характеристик Au-nGaAs ДШ одинаковой площадью  $S_i = 7853,98 \text{ мкм}^2$  разными ( $i$ ) формами (см.рис.19).  $a$  – темновые (dark) и  $b$  – световые (light)

На рис.20 представлены обратные темновые (*a*) и соответствующие им световые (*b*) ВАХ диодов Шоттки 1-6. Как и для темновых ВАХ, значение обратных токов насыщения световых обратных ВАХ увеличивается при увеличении периферии. При этом значения на 2-3 порядка превышают значения обратных токов насыщения темновых обратных ВАХ, что указывает на значительное понижение действующей высоты барьера, определенной по ВАХ. Из табл.2 видно, что при увеличении периметра почти в 10 раз приводит к увеличению фототока на 2 порядка.



**Рис.20.** Обратные ветви вольтамперных характеристик Au-nGaAs ДШ одинаковой площадью  $S_i = 7853,98 \text{ мкм}^2$  разными (*i*) формами (см.рис.18). *a* – темновые (dark) и *b* – световые (light)

Таким образом, Для исследуемых ДШ с большим периметром, т.е. значительным влиянием ДЭП, изменение приборных характеристик и эффективность преобразования световой энергии в электрическую значительно больше.

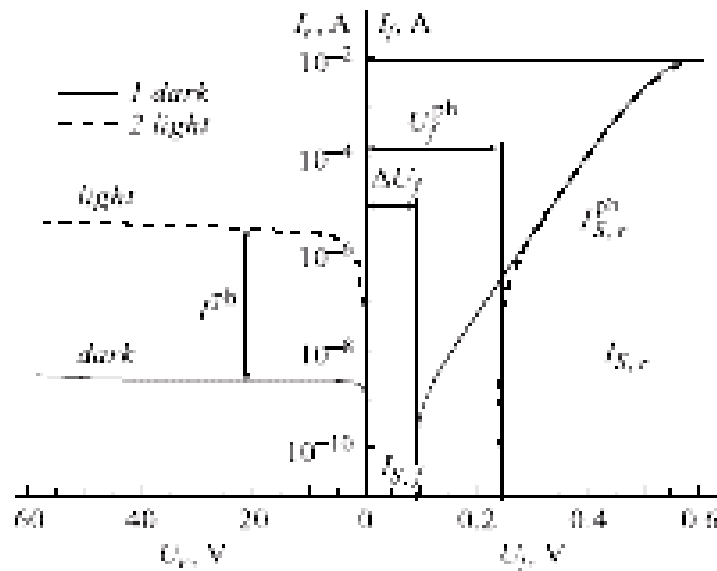
### **Образцы с новыми свойствами и закономерностями на основе КМП диодов с ДЭП**

На основе открытия возникновения ДЭП в реальных КМП уже разработаны полупроводниковые приборы с новыми свойствами и закономерностью. В работе [20] в результате всесторонних АСМ - исследований КМП с ДЭП на основе Au - nGaAs структур был разработан КМП преобразователь световой энергии в электрическую, где световой ток превышает темновой ток более чем в 1000 раз. Между тем в аналогичном КМП преобразователе без ДЭП ток фотоэдс превышает темновой ток всего около 10 раз. Типичные темновые и световые ВАХ таких преобразователей с повышенной эффективностью преобразования световой энергии в

электрическую представлены на рис.21. Световые ВАХ измерялись при освещении контактов красным светом с длиной волны равной 645 нм.

В работе [21] проведено исследование токопрохождения и формирования потенциального барьера в одиночных и матричных узких КМП с ДЭП и контактной поверхностью длиной 200 мкм и ширинами 1 мкм и 4 мкм, изготовленных на основе контакта металла Au и полупроводника n-типа GaAs с удельным сопротивлением 1 Ом см. Обнаружено, что особенности токопрохождения в узких ДШ находятся в хорошем согласии с механизмом термоэлектронной эмиссии токопрохождения в высококачественных плоских ДШ в прямом направлении и существенно отличаются в обратном направлении.

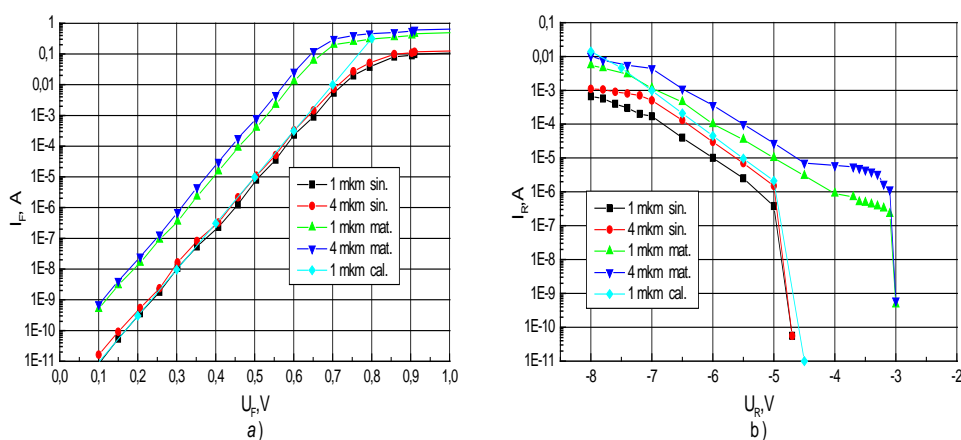
Прямые ветви ВАХ узких ДШ изображаются прямыми линиями в полулогарифмическом масштабе в широком интервале тока около 9 порядков при увеличении напряжения до 0,7 В и имеет фактор идеальности близкий к единице (рис.22,а). Обратные ветви ВАХ узких ДШ имеют специфические особенности в отличие от ВАХ плоских ДШ (рис.22,б). При начальных обратных напряжениях ток в узких ДШ отсутствует и в дальнейшем увеличении напряжения ток сначала увеличивается скачком при напряжениях 3-4 В, а потом увеличивается линейно на 3-5 порядков в полулогарифмическом масштабе при увеличении напряжения до около 7В. Токи насыщения в прямом и обратном направлениях совпадают. Зависимость высоты потенциального барьера ДШ от приложенного напряжения в обоих направлениях приобретает линейный характер.



**Рис.21.** Темновые (dark) и световые (light) прямые и обратные вольтамперные характеристики Au-nGaAs преобразователя площадью 7853,98 мкм<sup>2</sup> с ДЭП и повышенной эффективностью преобразовании световой энергии в электрическую.

Определены численные значения таких параметров одиночных и матричных узких ДШ как токи насыщения, действующей высоты барьера, фактора идеальности, безразмерного коэффициента прямой и обратной ветвей ВАХ и выявлены органические корреляции между этими электрофизическими параметрами.

Были построены энергетические диаграммы узких ДШ при отсутствии приложенного напряжения и при наличии прямого и обратного напряжения. Установлено, что электронные процессы в узких Au-nGaAs ДШ хорошо описываются энергетической моделью реальных контактов металл – полупроводник с ДЭП [6].



**Рис.22.** Прямые (а) и обратные (б) вольтамперные характеристики узких (1 мкм и 4 мкм) одиночных и матричных Au-nGaAs диодов Шоттки с ДЭП.

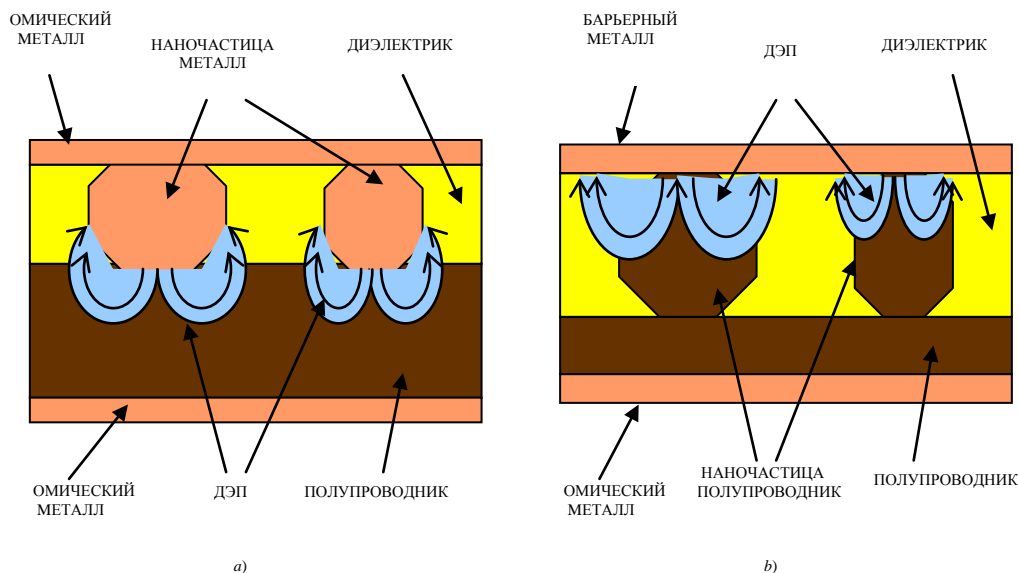
### Принципиальные структуры полупроводниковых преобразователей на основе НАНО - КМП с ДЭП

Полупроводниковые преобразователи (ПП) на основе КМП широко используются в современных электронных устройствах для преобразования различных видов энергии в электрическую. Такие ПП КМП, как солнечные элементы, фотоэлементы, тензоэлементы, датчики механических напряжений, датчики радиационных излучений и др. с одной стороны, нашли интенсивное применение, с другой – их электрофизические свойства все еще систематически исследуются. Так как электрофизические процессы, происходящие в таких реальных ПП часто трудно интерпретируются с помощью основных положений фундаментальных теорий и энергетических моделей идеализированных КМП.

Результаты современных экспериментальных и теоретических исследований твердо установил существенное различие в электрофизических процессах, происходящих в реальных и идеальных КМП [6,22]. Одной из основных причин этого различия является образование ДЭП в КМП из-за как эмиссионной неоднородности границы раздела контакти-

рующих материалов, так и ограниченности контактной поверхности со свободными поверхностями металла и полупроводника. Необходимо отметить, что энергетические модели и механизмы токопрохождения в реальных КМП с учетом объективно существующих ДЭП достаточно хорошо объясняют почти все особенности экспериментально наблюдаемых электрофизических параметров и характеристик ПП КМП, изготовленных на различных контактных структурах при различных экспериментальных условиях [6].

Полупроводниковые преобразователи обычно изготавливаются на основе известных теоретических принципах, реализуемых на нескольких физических элементах: p-n переходе, гетеропереходе, КМП, металл – диэлектрик – полупроводник структуре и металл – диэлектрик – металл структуре. В отличие от других физических элементов, такая особенность, как образование ДЭП в полупроводниковых приконтактных активных областях реальных КМП открывает перспективы изготовления ПП КМП на основе новых физических принципов. Так как, ДЭП играет активную роль как в образовании потенциального барьера в реальных КМП, так и в особенности токопрохождения. При этом потенциальный барьер образуется даже в том случае, когда известные условия Шоттки о выпрямлении КМП не выполняются. Это ярко выражается при использовании металлических и полупроводниковых наночастиц в качестве контактирующих материалов для изготовления ПП КМП [23].



**Рис.23.** Принципиальные структуры НАНО - КМП с ДЭП полупроводниковых преобразователей на основе металлических (a) и полупроводниковых (b) наночастиц.

Для определенности рассматриваются ПП КМП, созданные на основе композитных материалов, содержащих в диэлектрических матрицах металлические и полупроводниковые наночастицы.

Схематическое изображение КМП на основе контакта металлических наночастиц в диэлектрической матрице со сплошной полупроводниковой пластинкой представлено на рис.23,*a*. На определенную однородную поверхность полупроводниковой пластинки с работой выхода  $\Phi_{\Pi}$  наносится тонкая (толщина порядка линейные размеры наночастиц) композитная пленка с металлическими наночастицами с работой выхода  $\Phi_{\text{М}}$ . На границах раздела металлических наночастиц и полупроводника образуется ДЭП, следовательно потенциальный барьер с высотой  $\Phi_{\text{ВО}}$  из-за контактной разности потенциалов между контактной поверхности с  $\Phi_{\text{В}} = \Phi_{\text{М}} - \Phi_{\Pi}$  и свободных поверхностей металла с  $\Phi_{\text{М}}$  и полупроводника с  $\Phi_{\Pi}$ . Структура снабжается омическими контактами в виде металлических пленок.

Схематическое изображение КМП на основе контакта полупроводниковых наночастиц в диэлектрической матрице со сплошной металлической пластинкой представлено на рис.23,*b*. На определенную поверхность металлической пластинки с работой выхода  $\Phi_{\text{М}}$  наносится тонкая (толщина порядка линейные размеры наночастиц) композитная пленка с полупроводниковыми наночастицами с работой выхода  $\Phi_{\Pi}$ . На границах раздела полупроводниковых наночастиц и барьерной металлической пленкой образуется ДЭП, следовательно потенциальный барьер с высотой  $\Phi_{\text{ВО}}$  из-за контактной разности потенциалов между контактной поверхности с  $\Phi_{\text{ВО}} = \Phi_{\text{М}} - \Phi_{\Pi}$  и свободных поверхностей металла с  $\Phi_{\text{М}}$  и полупроводника с  $\Phi_{\Pi}$ . Структура снабжается омическими металлическими контактами.

### **Заключение**

Открытие неизвестного ранее физического явления возникновения ДЭП в реальных КМП является большим событием в области современной электронной техники, особенно в микроэлектронике и нанотехнологии. Оно имеет фундаментальную физическую основу и достаточно твердо подтверждено прямым измерением АСМ методами, а также надежными электрофизическими, термоэлектрическими, фотоэлектрическими и конструктивно-технологическими экспериментальными методами.

Это явление позволяет открывать новые научные направления в области физики полупроводников и полупроводниковых приборов, твердого тела, тонких пленок, поверхности, нанофизики, микроэлектроники, фотоэлектроники, биоэлектроники, наноэлектроники и др. Оно позволяет более глубоко и детально интерпретировать процессы, происходящие в реальных контактных структурах конденсированных сред.

КМП структура является основным физическим элементом практически всех видов дискретных полупроводниковых приборов и компонентов интегральных микро- и наносхем. Явление ДЭП составляет научную основу повышения качества и расширения функциональных возможностей многочисленных дискретных полупроводниковых приборов, микросхем и наносхем, а также разработки новых классов приборов на основе КМП структур.

Это явление открывает широкие перспективы использования АСМ, СЭМ и других современных методов нанотехнологии для разработки и массовых производств наукаемких и инновационных дискретных полупроводниковых приборов, микросхем и наносхем.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Мамедов Р.К. Двухбарьерная физическая модель реальных контактов металл – полупроводник. Вестник Бакинского Университета: серия физ.мат. наук. 2001, № 2, с. 84–94.
2. Broun F. Uber die Stromleitung durx Schwefelmetalle. Ann. Phys. Chem., 1874, No 153, p.556-563
3. Bardeen J. Semiconductor Research Leading to the Point Contact Transistor. Nobel Lecture, December 11, 1956
4. Тригг Дж. Физика XX века: ключевые эксперименты. М.: Мир, 1978, с.168.
5. Родерик Э.Х. Контакты металл – полупроводник. М.: Радио и связи, 1982, 209 с.
6. Мамедов Р.К. Контакты металл – полупроводник с электрическим полем пятен. Баку: БГУ,
7. Торхов Н.А. Поверхностный потенциал дальнего действия контактов металл – полупроводник с барьером Шоттки. Деп. в ВИНТИ № 334-D2008 От 18.04.2008
8. Торхов Н.А. Влияние периферии контактов металл – полупроводник с барьером Шоттки на их электрофизические характеристики. ФТП, 2011, т.45, в.1, с.70-86.
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: рентгеноские, синхротронные и нейтронные исследования, 2009, № 1, с.57-66
10. Новиков В.А. Исследование морфологии и электронных свойств поверхности пленок АПШВ и контактов металл/АПШВ методом Атомно-Силовой Микроскопии, Автореферат кандидатской диссертации, Томск: ТГУ, 2010, 18 с.
11. Торхов Н.А. Природа электрического взаимодействия контактов Шоттки. ФТП, 2011, т.45, в.8, с.1041 – 1055
12. Marcus R.B., Haszko S.E., Murarka S.P., Irvin J.C. Scanning Electron Microscope Studies of Premature Breakdown Sites in GaAs IMPATT Testers. J. Electrochem. Soc.: Solid-State Science and Technology, 1974, v.121, No 5, p.692-699
13. Торхов Н.А. Влияние периферии контактов металл – полупроводник с барьером Шоттки на их статические вольт-амперные характеристики. ФТП, 2010, т.44, в.5. с.615 –627
14. Мамедов Р.К. Особенности токопрохождения в реальных диодах Шоттки. Прикладная физика. М., 2002, №4, с.143-151
15. Мамедов Р.К. Температурные зависимости токопрохождения в диодах Шоттки. Прикладная физика, М., 2003, №1, с.133-141
16. Мамедов Р.К. Температурные зависимости токопрохождения в диодах Шоттки при отсутствии краевых эффектов. Прикладная физика. М., 2003, №3, с.103-111

17. Мамедов Р.К. Температурные зависимости токопрохождения по периферии контакта диодов Шоттки. Прикладная физика. М., 2003, №4, с.125-133
18. Мамедов Р.К. Температурные зависимости токопрохождения в диодов Шоттки при больших обратных напряжениях. Прикладная физика. М., 2003, №5, с.118-125
19. Мамедов Р.К. Зависимости токопрохождения в диодов Шоттки от концентрации примесей полупроводника. Прикладная физика. М., 2003, №6, с.134-140
20. Торхов Н.А. Влияние фотоздс на токопрохождение в контактах металл – полупроводник с барьером Шоттки. ФТП, 2011, т.45, в.7, с.965 –973
21. Mamedov R.K., Yeganeh M.A. Current Transport and Formation of Energy Structures in Narrow Schottky Diodes, J. Microelectronics Reliability, 2012, v.52, №2, p 418 – 424
22. Мамедов Р.К. Электрофизические свойства реальных контактов металл – полупроводник, Автореферат докторской диссертации, Баку: БГУ, 2004, 60 с.
23. Мамедов Р.К. Полупроводниковые преобразователи. <http://www.nanometer.ru>

### **ƏLAVƏ ELEKTRİK SAHƏLİ REAL METAL – YARIMKEÇİRİCİ KONTAKTLARIN XÜSUSİYYƏTLƏRİ**

**R.Q.MƏMMƏDOV**

#### **XÜLASƏ**

Bu icmalda real metal-yarımkeçirici kontaktlarda (MYK) əvvəllər elmə məlum olmayan əlavə elektrik sahəsinin (ƏES) yaranma hadisəsinin fiziki əsasları əks olunmuşdur. Müxtəlif konfigurasiyalı, həndəsi ölçülü, kontakt materialı və aralıq məsafəli MYK-larda ƏES-nin Atom Qüvvə Mikroskopu ilə bilavasitə ölçülmüş nəticələri verilmişdir. Makro, mikro və nanoqurluqlu MYK-ların elektrofiziki, termoelektrik, fotoelektrik və konstruktiv-texnoloji eksperimental ölçmələrində ƏES-in xüsusiyyətləri göstərilmişdir.

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

### **FEATURES OF ADDITIONAL ELECTRIC FIELD IN REAL METAL - SEMICONDUCTOR CONTACTS**

**R.K.MAMMADOV**

#### **SUMMARY**

This review describes the physical basis of a previously unknown physical phenomenon of occurrence of additional electric field (AEF) in the metal - semiconductor contact (MSC). The paper presents the results of the direct measurement of the AEF by Atomic Force Microscopy in the MSC with different configurations, geometric dimensions, contact materials and the distances between the closest contacts. Specific characteristics of AEF in the electrical, thermoelectric, photovoltaic and constructive – technological experimental measurements of the MSC with the macro, micro and nanostructures are shown.

**Key words:** contact metal - semiconductor, Schottky diode, Schottky barrier, additional electric field, semiconductor converters.

*Postupila v redaktsiyu: 20.11.2013 g.*

*Podpisano k печати: 27.12.2013 g.*