

Влияние периферии контактов металл–полупроводник с барьером Шоттки на их статические вольт-амперные характеристики

© Н.А. Торхов[†]

ОАО „Научно-исследовательский институт полупроводниковых приборов“,
634050 Томск, Россия

(Получена 25 августа 2009 г. Принята к печати 7 сентября 2009 г.)

Исследование методом Кельвина атомно-силовой микроскопии электростатического потенциала поверхности золотых контактов с барьером Шоттки на *n*-GaAs показало, что вокруг контактов существует протяженная на десятки мкм переходная область (ореол), в которой поверхностный потенциал изменяется от потенциала свободной поверхности *n*-GaAs до потенциала поверхности золотого контакта. Потенциал контакта и распределение потенциала в окружающем его ореоле определяются конструкцией контакта. Исследования токов растекания показали, что за счет сильных электрических полей ореола по периметру контакта существует высокопроводящая область (периферия), приводящая к появлению токов утечки. Проводимость основной площади контакта обусловлена локальными областями 100–200 нм с повышенной и пониженной проводящими способностями. Формирование вокруг контактов мезы приводит к уменьшению работы выхода, уменьшению протяженности ореола и напряженности электрического поля в нем, что сопровождается размытием и понижением проводимости периферийной области. Это приводит к исчезновению токов утечки и уменьшению показателя идеальности. Защита периферийной области контакта диэлектрической пленкой SiO₂ толщиной 0.5 мкм, напротив, увеличивает работу выхода, что сопровождается образованием вокруг контакта ориентированных по двум взаимно перпендикулярным кристаллографическим направлениям лепестков потенциала. Более сильное проникновение электрических полей ореола в область контакта приводит к увеличению показателя идеальности, исчезновению высокопроводящей периферийной области и токов утечки. Различие электрофизических свойств периферии, зерен золота и их границ определяет механизм включения контакта при подаче прямого или обратного смещений.

1. Введение

Неослабевающий интерес к контактам металл–полупроводник (КМП) с барьером Шоттки (БШ) в настоящее время обусловлен широким использованием КМП-систем в современной микро- и нанoeлектронике. В свою очередь нанoeлектронные технологии требуют дальнейшего уменьшения размеров активных элементов КМП-систем, к которым в первую очередь относятся линейные размеры контактов металл–полупроводник. При конструировании микроэлектронных устройств и моделировании прохождения электронов (токопереноса) в КМП с БШ обычно рассматривается только площадь контакта [1,2]. Несмотря на это, в ряде работ было показано, что даже на микроуровне нельзя полностью пренебречь влиянием периферии контакта на его приборные характеристики [3–7]. Из общих физических соображений понятно, что уменьшение диаметра контакта ведет к возрастанию влияния периферии на токоперенос и, как следствие, на его приборные характеристики. Так, в [8] было показано, что для диаметров КМП с БШ на уровне сотен нанометров периферия контакта уже играет определяющую роль в токопереносе и значительно изменяет вид его прямой вольт-амперной характеристики (ВАХ), логарифм которой теперь описывается нелинейной зависимостью. В [9–11] было показано, что в ВЕЕМ-методе (ballistic electron emission microscopy) вольт-амперные характеристики $I(U)$ контакта острия сканирующего электрода („tip“-а) диамет-

ром в пределах нескольких десятков нанометров с поверхностью полупроводника описываются квадратичной зависимостью.

Таким образом, вопрос о влиянии периферии контакта на приборные характеристики КМП с БШ в настоящее время все еще остается мало изученным [12,13]. Неизвестно, какую область периметра контакта относить к периферии, а какую к основной площади контакта. Нет ответов и на вопрос о роли периферии в общем токопереносе через контакт при прямых и обратных смещениях. Недостаточно исследована физическая природа периферийной области контакта металл–полупроводник с барьером Шоттки.

В связи с этим в настоящей работе методами атомно-силовой микроскопии (АСМ) путем измерения рельефа и потенциала поверхности, содержащей контакты металл–полупроводник с барьером Шоттки, а также тока растекания проводится исследование электрофизических свойств периферии контакта и его проводящей способности.

2. Методика проведения экспериментов

В работе исследовались контакты металл–полупроводник Au/*n*-GaAs:Sn с барьером Шоттки диаметром 15 мкм с незащищенной поверхностью *n*-GaAs вокруг периферии контакта (далее — свободные контакты), с защищенной вокруг контакта диэлектрической пленкой

[†] E-mail: trkf@mail.ru

SiO₂ толщиной 0.5 мкм поверхностью *n*-GaAs (защищенные контакты), а также сформированные на мезаструктурах контакты (мезаконтакты). Эпитаксиальные слои *n*-GaAs:Sn (100) толщиной 0.5 мкм с концентрацией электронов $4.5 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$ выращивались на высоколегированной подложке методом МОС-гидридной эпитаксии (газофазной эпитаксии из металлорганических соединений).

Контакты Au/*n*-GaAs с БШ изготавливались по стандартному технологическому маршруту, включающему: 1) предварительную химическую очистку путем последовательных обработок в моноэтаноламин (C₂H₇ОН), диметилформамиде (C₃H₇ОН) и изопропиловом спирте (C₃H₇ОН); 2) разделение пластины на две части; 3) удаление собственных окислов в растворе H₂SO₄:H₂O = 1:10 (рН = -0.5) в течение 30 с с последующей промывкой в деионизованной воде (декапировка); 4) плазмохимическое осаждение диэлектрической пленки диоксида кремния SiO₂ разложением моносилана при температуре 280°C, толщиной 10 нм на поверхность эпитаксиального слоя *n*-GaAs первой части пластины и толщиной 0.5 мкм на поверхность второй; 5) формирование омических контактов со стороны *n*⁺-слоев электрохимическим осаждением сплава AuGe (0.2 мкм) с последующим отжигом в атмосфере молекулярного водорода в течение 5 мин при температуре 430°C и последующим осаждением слоя золота толщиной 0.2 мкм; 6) формирование контактных окон в диэлектрической пленке SiO₂ путем ее удаления в окнах фоторезиста в буферном травителе (HF:NH₄F:H₂O = 90:690:186 об%); 7) финишную обработку (декапировку) поверхности *n*-GaAs в окнах фоторезиста и SiO₂; 8) электрохимическое осаждение в окнах SiO₂ барьерных Au-контактов толщиной 0.15 мкм. Для получения свободных контактов после удаления фоторезистора с поверхности первой части пластины в буферном травителе по периферии контактов удалялся защитный слой SiO₂ толщиной 10 нм. Периферия контактов на второй части пластины оставлялась защищенной диэлектрической пленкой SiO₂ толщиной 0.5 мкм — так получались контакты с защищенной периферией. Далее от первой части пластины откалывалась еще одна часть, на которой вокруг металлических контактов химическим травлением в травителе на основе лимонной кислоты (C₆H₈O₇(50%):C₃H₇ОН:H₂O₂ = 450:50:5 об%) формировалась меза глубиной 0.15 мкм. Затем с использованием методов атомно-силовой микроскопии проводились измерения рельефа $h(x, y)$, распределения контактной разности потенциалов (КРП) $\Delta\varphi(x, y)$ по поверхности, а также токов растекания $I_{\text{пр}}(x, y)$ через контакт иглы кантилевера с поверхностью свободных, защищенных и мезаконтактов Au/*n*-GaAs при заданном прямом (U_f) или обратном (U_r) смещении. Измерение прямых вольт-амперных характеристик изготовленных КМП с БШ проводилось на автоматизированном измерителе характеристик полупроводниковых приборов с использованием механических микроманипуляторов.

Для определения из измерений высоты потенциально-го барьера контакта φ_{bm} использовалось выражение [14]

$$\varphi_{bm} = \frac{kT}{q} \ln \left(\frac{R^* T^2}{J_s} \right), \quad R^* = \frac{4\pi q m^* k^2}{h^3}, \quad (1)$$

где R^* — эффективная постоянная Ричардсона, $J_s = I_s/S$ — плотность тока насыщения, S — площадь контакта, I_s — ток насыщения, T — абсолютная температура, k — постоянная Больцмана, h — постоянная Планка, q — заряд электрона. Тогда реальная высота барьера φ_b будет определяться, согласно [14], как $\varphi_b = n\varphi_{bm}$.

Значение показателя идеальности n определялось в интервале токов $I = 10^{-3} - 10^{-7}$ А по наклону линейного участка ВАХ $J(U)$ в полулогарифмическом масштабе согласно выражению [14]

$$n = \left[1 - \frac{d\varphi_b(U)}{dU} \right]^{-1} = \frac{q}{kT} \frac{\partial U}{\partial (\ln J)}. \quad (2)$$

Значение последовательного сопротивления контакта R_s при токах $10^{-4} - 10^{-1}$ А определялось как

$$R_s = R_{sd} - R_B, \quad (3)$$

где $R_{sd} = \Delta U / \Delta I$ — измеряемое сопротивление контакта при токах $10^{-4} - 10^{-1}$ А, а $R_B = nkT/qI$ — последовательное сопротивление барьера при тех же токах.

Двухпроходная методика измерения пространственного и потенциального (Kelvin probe — метод Кельвина) рельефов арсенидгаллиевых и золотых поверхностей с использованием атомно-силового микроскопа „Solver-HV“ в полуконтактном режиме на воздухе при нормальных условиях была подробно описана в работах [15–18] и во многом аналогична описанной в [19]. Для проведения АСМ-измерений использовались Si-кантилеверы марки NSG10/W₂C, с твердым токопроводящим покрытием W₂C толщиной 30 нм, с работой выхода $q\varphi_p = 4.902$ эВ [20]. Используемые геометрические размеры игл (радиус острия 30–35 нм, угол конуса 21°, длина иглы 15 мкм, ширина балки 35 мкм, резонансная частота механических колебаний балки 280 кГц) позволяли проводить измерения потенциала с погрешностью (так называемое „приборное влияние“), не превышающей 25% в непосредственной близости от измеряемого объекта и 2.5% на расстоянии 2 мкм от него [17–19]. Число шагов в кадровой и строчной развертках составляло 256. Согласно [17,18,21], в режиме метода Кельвина измеряется контактная разность потенциалов $\Delta\varphi(x, y)$ между потенциалом острия иглы измерительного зонда (*p*-probe) φ_p и потенциалом $\varphi_{s(m)}$ поверхности полупроводника (*s* — полупроводник, в данном случае φ_{GaAs}) или потенциалом поверхности металла (*m* — металл, в данном случае φ_{Au}) на расстоянии $\Delta Z = 10$ нм между ними:

$$\Delta\varphi_{s(m)} = \varphi_p - \varphi_{s(m)}. \quad (4)$$

Из (4) видно, что метод Кельвина позволяет определять работу выхода электронов или положение уровня Ферми

исследуемой поверхности с точностью до φ_p [17,18]. Иначе говоря, зная φ_p , мы с заданной точностью можем определить и абсолютное значение работы выхода электронов из полупроводника (металла) или фактическое положение уровня Ферми на поверхности полупроводника (металла):

$$\varphi_{s(m)} = \varphi_p - \Delta\varphi_{s(m)}. \quad (5)$$

Другим используемым в работе информативном АСМ-методом является метод „отображения сопротивления растекания“, который позволяет получить двумерное распределение тока растекания на исследуемом участке токопроводящей поверхности при заданном смещении. Для этого используется контактный режим измерения методом „постоянной силы“ с использованием токопроводящего зонда [21,22]. В этом режиме измерения зонд заземлен, а потенциал смещения прикладывается к образцу. В результате этого на АСМ-изображениях при подаче прямого смещения U_f направление электрического тока будет отрицательным, а при подаче обратного смещения U_r — положительным. Измерения результирующего тока через контакт острия иглы кантилевера с проводящей поверхностью проводятся каждый раз при изменении шага сканирования в кадровой или строчной развертке на единицу. Для предотвращения выгорания иглы электрическая схема атомно-силового микроскопа предусматривает ограничение по току — не более 50 нА. В предположении постоянного контактного сопротивления зонд–поверхность при заданном смещении величина измеряемого тока пропорциональна локальному сопротивлению исследуемого образца. В связи с этим данный метод имеет и другое название — метод „распределения тока растекания“, так как в результате получается токовое изображение поверхности $I_{pr}(x, y)$ [22]. При этом одновременно с распределением тока растекания снимаются данные о рельефе $h(x, y)$ и распределении латеральных сил исследуемого участка поверхности. Латеральные силы, согласно методике измерения [21], отражают локальные взаимодействия иглы кантилевера с поверхностью при ее скольжении по поверхности.

3. Результаты

На рис. 1 представлены прямые ВАХ свободных (free contact, кривая 1), меза- (mesa contact, кривая 2) и защищенных (protected contact, кривая 3) контактов металл–полупроводник с барьером Шоттки диаметром 15 мкм. Из приведенных на рис. 1 данных видно, что приборные характеристики свободных, меза- и защищенных контактов хорошо укладываются в рамки известных представлений. Так, формирование мезы приводит к исчезновению на ВАХ так называемых „ступенек“ (токов утечки) при малых токах до 10^{-8} А, уменьшению показателя идеальности n , незначительному уменьшению токов насыщения и увеличению последовательного сопротивления R_s . Исчезновение токов утечки после

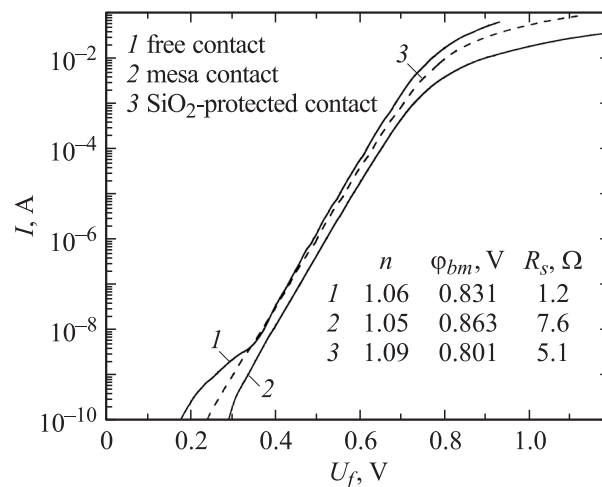


Рис. 1. Прямые ветви ВАХ контактов Au/n-GaAs с барьером Шоттки диаметром 15 мкм: 1 — свободный контакт, 2 — меза-контакт, 3 — защищенный контакт.

формирования мезы можно связать с понижением напряженности электрического поля по периферии контакта, а уменьшение токов насыщения — с подтравом под контакт, в результате чего могло произойти незначительное уменьшение площади контакта. Защита периферии контакта диэлектрической пленкой SiO_2 также приводит к исчезновению токов утечки [3,4], вместе с тем к увеличению показателя идеальности n и увеличению последовательного сопротивления R_s . Отсутствие токов утечки (ступенек) на ВАХ защищенных контактов можно связать с защитными свойствами диэлектрической пленкой SiO_2 . Большие значения показателя идеальности n и наличие ступенек (токов утечки) на прямых ВАХ было объяснено в работах [3,4,6] на основе локального уменьшения высоты барьера. Таким образом, наблюдаемое поведение ВАХ контактов металл–полупроводник с БШ логично связать с заметным влиянием периферийной области на процесс токопрохождения в контактах.

На рис. 2, а представлено трехмерное АСМ-изображение свободного золотого контакта диаметром 15 мкм. Видно, что поверхность эпитаксиального n -GaAs, на которой сформирован золотой контакт, как и поверхность самого контакта, не являются идеально плоскими. В [17,23–25] было показано, что их рельефы имеют фрактальную геометрию с дробной размерностью $2 < D_f < 3$.

Трехмерное распределение КРП $\Delta\varphi(x, y)$ по исследуемому участку поверхности, содержащей свободный золотой контакт, представлено на рис. 2, б. Хорошо видно, что КРП поверхности в области контакта имеет меньшее значение, ~ 0.2 В (работа выхода $q\varphi_{\text{Au}} = 4.702$ эВ (5)), чем КРП свободной от контакта поверхности n -GaAs, ~ 0.48 В (работа выхода $q\varphi_{\text{GaAs}} = 4.422$ эВ (5)). При этом линейные размеры области с меньшим значением КРП практически совпадают с линейными размерами контакта. Обращает на себя внимание наличие протяженной

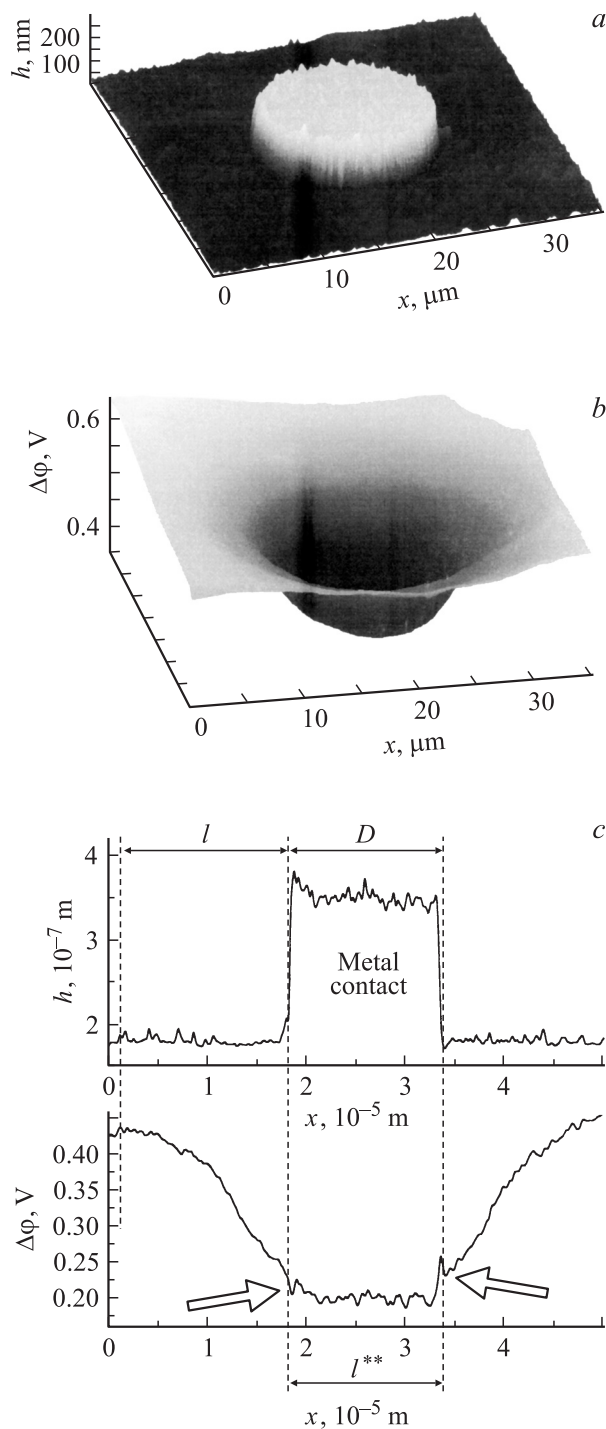


Рис. 2. Трехмерные АСМ-изображения рельефа $h(x, y)$ (a), распределения КРП $\Delta\phi(x, y)$ (b) и профилей поперечных сечений $h(x)$ и $\Delta\phi(x)$ (c) свободного контакта Au/*n*-GaAs с барьером Шоттки диаметром 15 мкм.

области вокруг контакта — ореола шириной $l \approx 15$ мкм с плавно увеличивающимся значением КРП — от КРП контакта до КРП свободной поверхности *n*-GaAs. Характер распределения КРП наиболее наглядно прослеживается на вертикальных сечениях $h(x)$ и $\Delta\phi(x)$ (рис. 2, c). Согласно рис. 2, c, КРП в области контакта

$\Delta\phi(x)$ имеет четко выраженную полку с неким средним значением 0.2 В. Из сравнения $h(x)$ и $\Delta\phi(x)$ видно, что геометрические размеры полки l^{**} практически совпадают с диаметром контакта D . Видно, что на границе контакта потенциал имеет большой градиент (рис. 2, c, большие стрелки), что говорит о повышенной напряженности электрического поля по периферии. Более подробно потенциал открытой поверхности эпитаксиального *n*-GaAs, содержащий свободные золотые и платиновые контакты, был описан в работах [17,18]. Как было показано в [24,25], распределение КРП по поверхности эпитаксиального *n*-GaAs и барьерного контакта также подчиняется законам фрактальной геометрии.

На рис. 3, a представлено трехмерное АСМ-изображение мезаконтакта диаметром 15 мкм. Видно, что поверхность эпитаксиального *n*-GaAs после травления мезы в травителе на основе лимонной кислоты покрывалась отдельными выступами, образованными, судя по всему, оксидами мышьяка и галлия [16].

Трехмерное распределение КРП $\Delta\phi(x, y)$ мезаконтакта представлено на рис. 3, b. Хорошо видно, что уменьшение КРП в области контакта, ~ 0.57 В (работа выхода $q\phi_{\text{Au}} = 4.332$ эВ (5)) относительно КРП свободной поверхности *n*-GaAs, ~ 0.69 В (работа выхода $q\phi_{\text{GaAs}} = 4.212$ эВ (5)) значительно меньше. Увеличение значений КРП, как показали предварительные результаты, а также результаты [16], могло произойти вследствие изменения электронного сродства поверхности *n*-GaAs под воздействием используемого при формировании мезы травителя. Линейные размеры области с меньшим значением КРП (рис. 3, c, полка l^{**}) в данном случае меньше линейного размера контакта D . Ширина ореола l также заметно меньше и, согласно рис. 3, c, состоит из двух частей: области медленного изменения КРП, приблизительно равной l , и переходной области более быстрого изменения КРП $\Delta x = (D - l^{**})/2$. Хорошо видно, что переходная область ореола проникает в область контакта. Это приводит к тому, что градиент КРП на границе контакта теперь значительно меньше. Плавность, а также значительно меньшие относительные изменения КРП говорят о том, что область повышенного электрического поля сосредоточена теперь не в узкой периферийной области, а размыта по площади мезаконтакта на достаточно большом (~ 2 мкм) удалении от нее.

На рис. 4, a представлено трехмерное АСМ-изображение сформированного в окне диэлектрической пленки SiO_2 отдельного золотого контакта диаметром 15 мкм. Вследствие того что толщина защитной диэлектрической пленки SiO_2 (0.5 мкм) больше толщины золотых контактов (0.15 мкм), их поверхность находится ниже поверхности диэлектрической пленки, они как бы погружены в окна SiO_2 . Видно, что рельефы поверхности SiO_2 и золотого контакта, как и в предыдущем случае, не являются идеально плоскими и, как было показано в [23–26], также имеют фрактальную геометрию с $2 < D_f < 3$.

Распределение КРП защищенных контактов (рис. 4, *b*) имеет много общего с распределением КРП незащищенного контакта (рис. 2, *b*) и мезаконтакта (рис. 3, *b*). Так же наблюдаются уменьшение значений КРП в области контакта и наличие протяженного ореола шириной $l \approx 20$ мкм вокруг него. Размеры области с

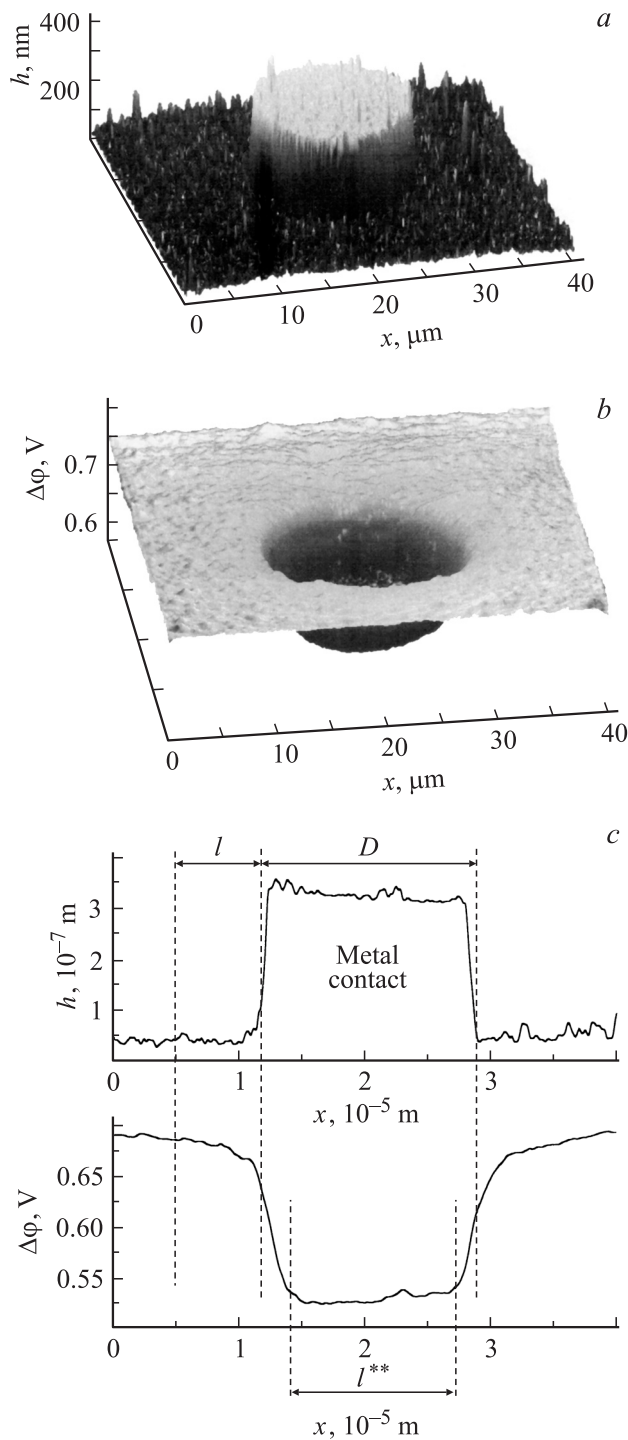


Рис. 3. Трехмерные АСМ-изображения рельефа $h(x, y)$ (*a*), распределения КРП $\Delta\phi(x, y)$ (*b*) и профилей поперечных сечений $h(x)$ и $\Delta\phi(x)$ (*c*) мезаконтакта Au/*n*-GaAs с барьером Шоттки диаметром 15 мкм.

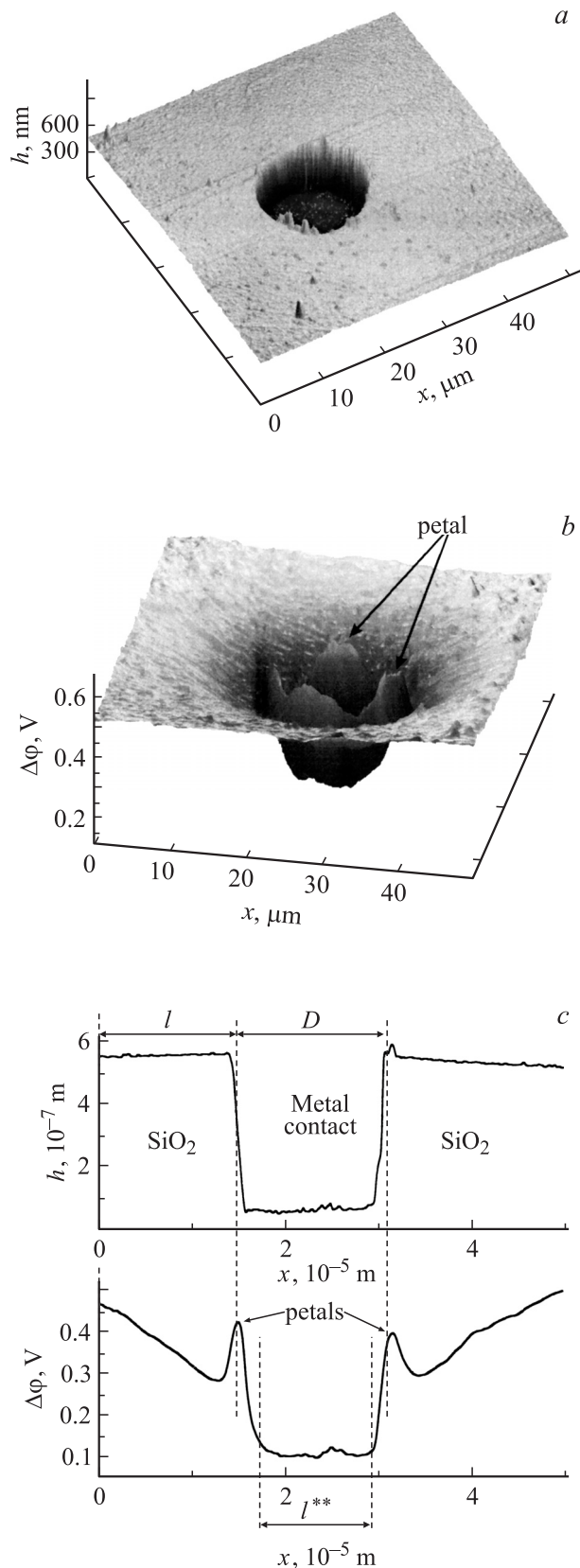


Рис. 4. Трехмерные АСМ-изображения рельефа $h(x, y)$ (*a*), распределения КРП $\Delta\phi(x, y)$ (*b*) и профилей поперечных сечений $h(x)$ и $\Delta\phi(x)$ (*c*) защищенного диэлектрической пленкой SiO₂ толщиной 0.5 мкм контакта Au/*n*-GaAs с барьером Шоттки диаметром 15 мкм.

меньшими значениями КРП (полки) так же меньше диаметра контакта D , а переходная область ореола проникает в область контакта. Отличия наблюдаются в увеличенном размере ореола l , а также в большем относительном изменении значений КРП при переходе из области полупроводника в область контакта — от 0.5 В ($q\phi_{\text{GaAs}} = 4.402\text{ эВ}$ (5)) для $n\text{-GaAs}$ до 0.1 В ($q\phi_{\text{Au}} = 4.802\text{ эВ}$ (5)) для области контакта. Отличием является и наличие четырех выступающих лепестков (рис. 4, *b*, petals) по периметру контакта с увеличенными значениями КРП, разбивающих ореол на четыре радиальных области, которые будут обсуждаться в следующем разделе. Исследования показали, что лепестки КРП располагаются не случайным образом, а ориентированы на поверхности по двум взаимно перпендикулярным направлениям в плоскости (x, y) $[011]$ и $[0\bar{1}1]$. Характер распределения КРП наиболее наглядно прослеживается на вертикальных сечениях $h(x)$ и $\Delta\phi(x)$ (рис. 4, *c*). Видно, что максимумы лепестков КРП располагаются на границе контакта, что указывает на практически полное отсутствие электрического поля на его периферии. Наличие лепестков КРП уместно связать с влиянием диэлектрической пленки SiO_2 на электрофизические свойства периферийной области контакта.

Таким образом, мы видим, что изменение величины и характера распределения КРП на участке поверхности, содержащей металлический контакт с барьером Шоттки, тесно связано с его конструкцией: наличием или отсутствием мезы, а также защитной диэлектрической пленки SiO_2 по периферии контакта.

Проведенное АСМ-исследование распределения токов растекания $I_{\text{pr}}(x, y)$ по поверхности эпитаксиального $n\text{-GaAs}$ выявили значительное влияние характера распределения КРП по периферии контактов на токопрохождение в них.

На рис. 5, *b-f* представлены двумерные контрастные АСМ-изображения распределения токов растекания свободного контакта при смещениях от $U_r = -10\text{ В}$ до $U_f = +10\text{ В}$ (I) с соответствующими профилями поперечных сечений (II). Хорошо видно, что при малых обратных смещениях основной ток проходит исключительно через периферийную область контакта. Согласно рис. 5, *b, c*, по мере увеличения обратного смещения до 5 В амплитуда периферийных токов растет. На это указывает увеличивающаяся яркость периферийной области контрастного изображения (рис. 4, *b, c*, I) и увеличивающаяся амплитуда токов растекания периферийной области на поперечных профилях (рис. 5, *b, c*, II). Степень яркости АСМ-изображения основной площади контакта внутри яркого кольца остается неизменной на уровне общего фона, что свидетельствует о практически полном отсутствии тока через основную площадь контакта. Проведенные с использованием прилагаемого к атомно-силовому микроскопу программного обеспечения измерения ширины высокопроводящей периферийной области (периферии) дали значение $\Delta x < 0.3\text{ мкм}$. Слабая зависимость ширины периферии от диаметра

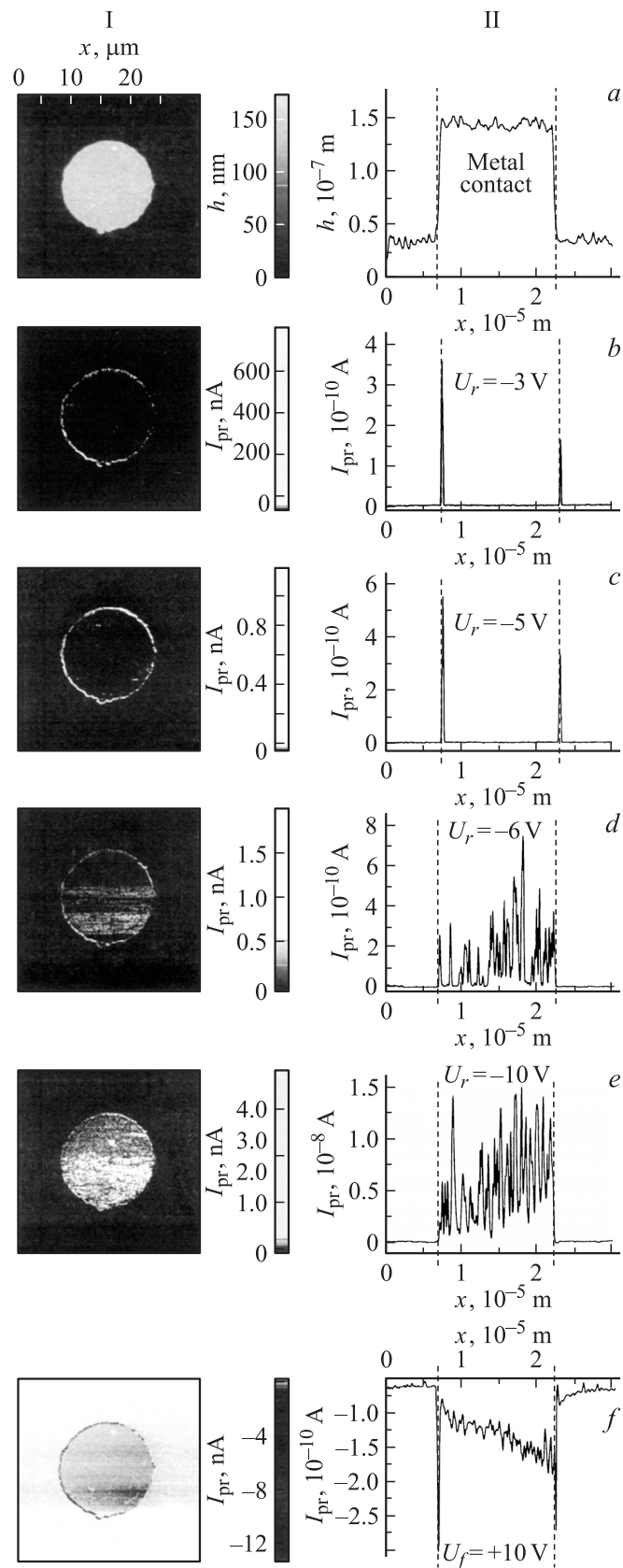


Рис. 5. Двумерные АСМ-изображения рельефа (*a*), токов растекания $I_{\text{pr}}(x, y)$ при смещениях $U_r = -3$ (*b*), -5 (*c*), -6 (*d*), -10 В (*e*), $U_f = +10\text{ В}$ (*f*) (I) со своими профилями поперечных сечений (II) свободного контакта $\text{Au}/n\text{-GaAs}$ с БШ.

контактов указывает в данном случае на ее немеханическое происхождение (золото — пластичный металл и поэтому не вызывает заметных механических напряжений). Интересно также и то, что ширина периферийной области практически не изменяется при изменении величины приложенного смещения. При $|U_r| > 6$ В включается основная площадь контакта (рис. 5, *d*, I), которая теперь при дальнейшем увеличении обратного смещения (рис. 5, *e*, I) будет давать основной вклад в ток через контакт. В результате включение контакта при подаче обратного смещения происходит следующим образом. При небольших обратных смещениях основной ток через контакт течет по его периферии. При достижении величиной $|U_r|$ некоторого значения (в данном случае $U_r = -6$ В) происходит постепенное включение локальных участков основной площади контакта, которые на рис. 5, *d–e*, I изображены в виде отдельных светлых пятен, а на профилях поперечных сечений — в виде отдельных максимумов $I_{pr}(x)$ (рис. 5, *d–e*, II). По мере увеличения обратного смещения амплитуда токов растекания через локально проводящие участки основной площади контакта увеличивается и становится равной амплитуде токов растекания по периферии контакта (или даже превышает ее). При этом постепенно включается все большее количество участков локальной проводимости по основной площади контакта, которые постепенно заполняют всю его площадь. Степень локализации таких участков в среднем составляет 100–200 нм и, согласно полученным результатам, соизмерима с размером зерен, образующих структуру золотого контакта [12]. При $|U_r| > 6$ В практически вся поверхность контакта становится проводящей. Дальнейшее увеличение $|U_r|$ приводит к одновременному росту токов растекания как по периферии, так и по основной площади контакта. Из поперечных сечений хорошо видно (рис. 5, *e*, II), что не вся площадь контакта одинаково проводит электрический ток — имеются локальные участки размером 100–200 нм с различной проводимостью [12], что не может не сказаться на эффективности проводящей способности контакта. Согласно базовому принципу оптимизации Вильфредо Парето, под эффективностью проводящей способности контакта будем понимать процентную составляющую проводящей площади контакта, обеспечивающей протекание 80% тока [27]. На рис. 6 представлены АСМ-изображения участка 3×3 поверхности исследуемого контакта: рельефа (*a*), распределения латеральных сил LF (аналог фазового контраста [16]) [21] (*b*) и тока растекания $I_{pr}(x, y)$ при $U_r = -10$ В (*c*). Полученные данные показывают, что распределение токов растекания (проводимость) по площади контакта сильно неоднородно. Имеется совокупность локальных участков с различающейся более чем в 10 раз проводимостью. Из сравнения рис. 6, *b* и *c* видно, что максимум тока растекания приходится на поверхность образующих металлическую пленку зерен, а минимум — на границы зерен. Это соответствует полученным ранее результатам распределения

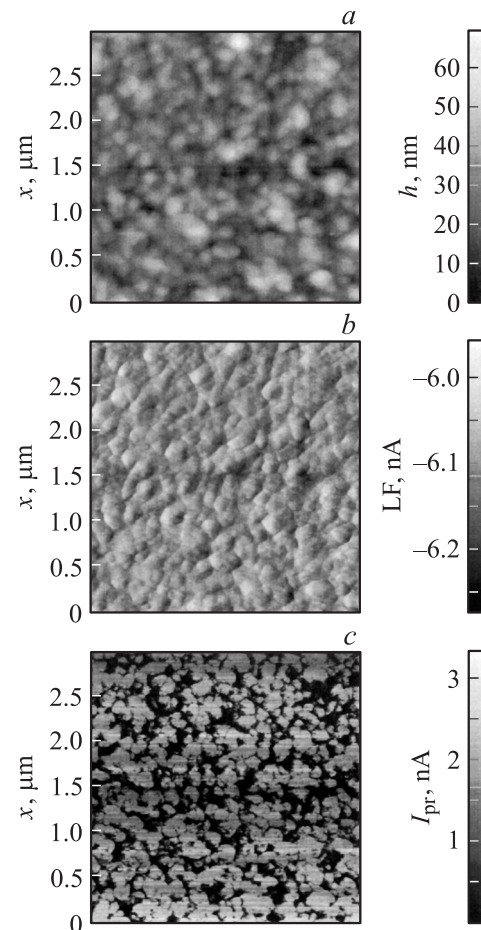


Рис. 6. Двумерные АСМ-изображения участка поверхности свободного Au-контакта диаметром 15 мкм и толщиной ~ 0.15 мкм: *a* — рельеф $h(x, y)$, *b* — распределение латеральных сил, *c* — распределение токов растекания $I_{pr}(x, y)$.

КРП поверхности золотой пленки [17,18] — на границах зерен КРП выше. Таким образом, можно предположить, что меньшие значения токов растекания по границам зерен золотого контакта обусловлены более высоким потенциальным барьером на границе контакта металл–полупроводник с БШ.

При прямых смещениях U_f распределение тока растекания в зависимости от величины приложенного напряжения изменяет свой характер (рис. 5, *f*). Увеличение U_f не приводит к относительному уменьшению периферийных токов. Даже напротив, с увеличением U_f периферийные токи увеличиваются несколько быстрее токов по площади контакта, что особенно хорошо заметно на профиле поперечного сечения $I_{pr}(x)$ (рис. 5, *f*, II). Размеры периферийной области при этом также практически не изменяются. Интегральная величина тока через периферийную область при небольших прямых (0.2–0.4 В) и обратных (< 0.5 В) смещениях составляет 10^{-9} – 10^{-8} А, что, согласно ВАХ (рис. 1, кривая I), соответствует области утечек (ступенек). Таким образом, мы можем заключить, что токи утечки при малых

прямых смещениях на свободном контакте объясняются именно локализованным по периферии контакта током электронов. При прямых смещениях проводимость основной площади контакта также неоднородна. Имеются локальные участки с минимальной и максимальной проводимостью, количество которых увеличивается по мере увеличения $|U_f|$. При $|U_f| > 0.3\text{--}0.4\text{ В}$ практически вся площадь контакта становится проводящей. Линейные размеры областей с локальной проводимостью, как указывалось выше, варьируются от 100 до 200 нм. При прямых смещениях периферийные токи всегда превышают основные токи по площади контакта, и чем больше смещение U_f , тем это различие больше. Так происходит включение свободного контакта при подаче прямого смещения. Еще отметим, что размеры высокопроводящей периферийной области, по всей вероятности, определяются совершенством (геометрией) контактирующего с полупроводником края барьерного контакта, а также размером образующих его зерен.

На рис. 7, *b–e* представлены двумерные АСМ-изображения распределения токов растекания мезаконтакта при смещениях от $U_f = +0.4\text{ В}$ до $U_r = -7\text{ В}$ (I) с соответствующими профилями поперечных сечений (II). Было получено, что при прямых смещениях распределение тока растекания по площади мезаконтакта полностью аналогично распределению по площади свободного контакта. Токи растекания по периферии всегда превышают токи растекания по основной площади контакта. Разброс токов растекания по периферии и основной площади контакта увеличивается с увеличением U_f . При обратных смещениях характер распределения тока растекания по площади мезаконтакта в зависимости от значения обратного смещения несколько изменился. Значительно, до 2 мкм, увеличилась ширина высокопроводящей периферийной области. Теперь при подаче даже небольшого обратного смещения, $U_r = -2\text{ В}$ (рис. 7, *d*), электрический ток течет не только по периферии, но и по основной площади контакта. При этом основная площадь контакта также образована отдельными участками, локальная проводимость которых может различаться в десятки раз. Увеличение значения $|U_r|$ до 7 В приводит к включению всей площади контакта. Распределение $I_{pr}(x, y)$ в отличие от предыдущего случая более однородно (рис. 7, *e*).

На рис. 8 представлены двумерные АСМ-изображения рельефа защищенного контакта диаметром 15 мкм (*a*, I), распределения токов растекания при обратном смещении -4 В (*b*, I) вместе со своими профилями поперечных сечений (II). Напомним, что контакт толщиной 0.15 мкм расположен в окне SiO_2 толщиной 0.5 мкм. Вследствие этого на АСМ-изображении контакт выглядит более темным, чем поверхность SiO_2 . В отличие от свободного и мезаконтактов на АСМ-изображениях токов растекания защищенных контактов для всех значений прямых и обратных смещений отсутствуют токи растекания по периферии контакта. Периферийная

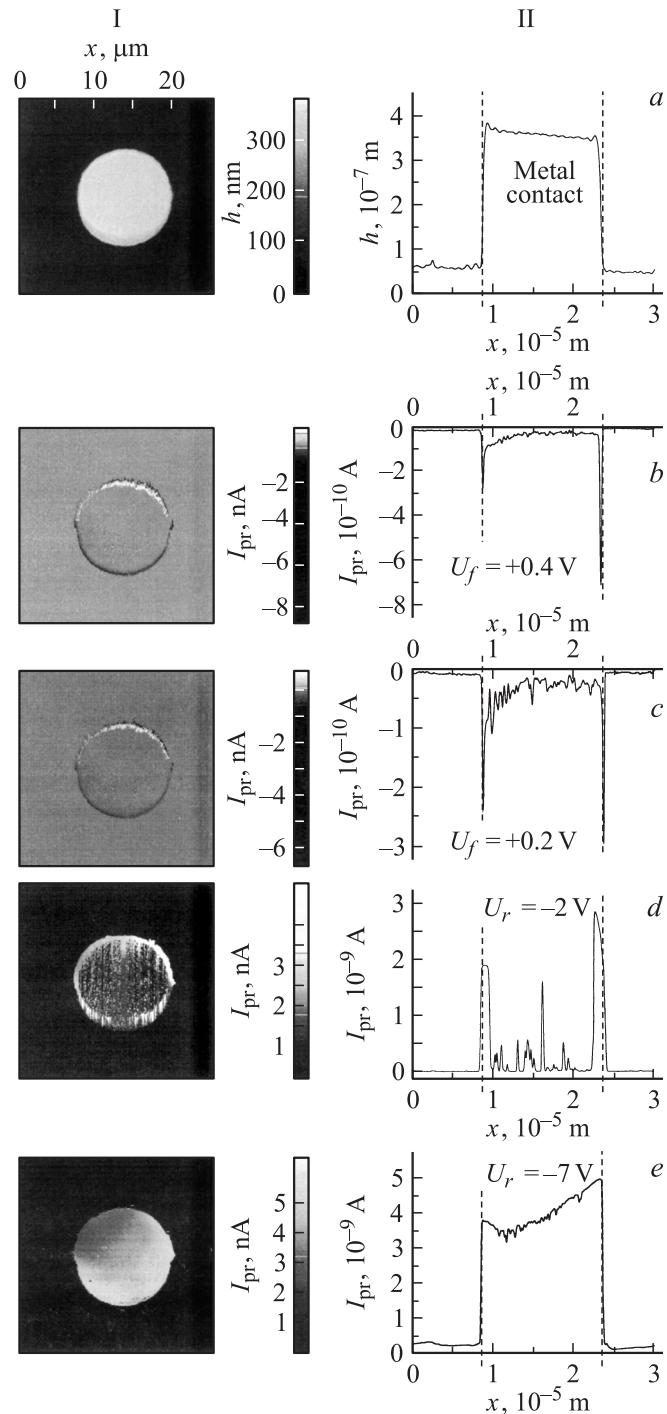


Рис. 7. Двумерные АСМ-изображения рельефа (*a*), токов растекания $I_{pr}(x, y)$ при смещениях $U_r = +0.4$ (*b*) и $+0.2\text{ В}$ (*c*), $U_r = -2$ (*d*) и -7 В (*e*) (I) со своими профилями поперечных сечений (II) мезаконтакта Au/n-GaAs с БШ.

область, обеспечивающая преимущественное токопрохождение в свободном контакте, на защищенном контакте отсутствует. Согласно профилям поперечных сечений, увеличение $|U_r|$ приводит к увеличению амплитуды токов растекания одновременно по всей площади контакта. Разброс проводимости по площади контакта при этом

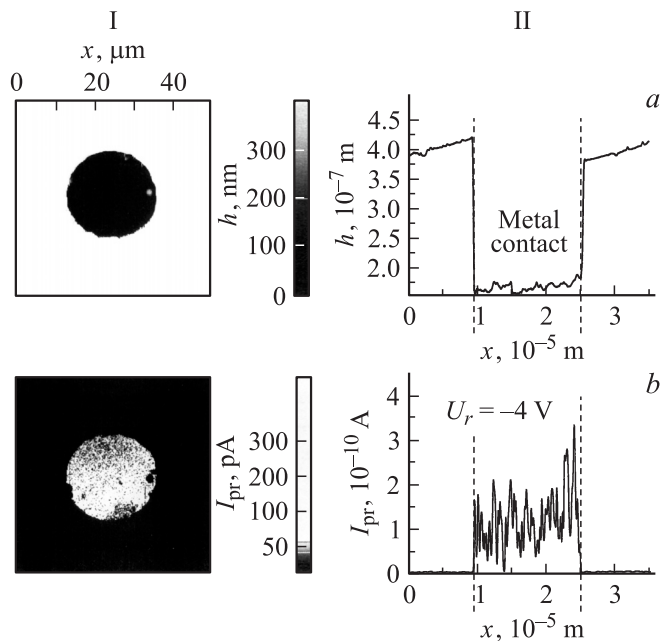


Рис. 8. Двумерные АСМ-изображения рельефа (а), токов растекания $I_{\text{pr}}(x, y)$ при смещении $U_r = -0.4$ В (б) (I) со своими профилями поперечных сечений (II) защищенного диэлектрической пленкой SiO_2 толщиной 0.5 мкм контакта Au/n-GaAs с БШ.

значительно меньше (рис. 8, б, II), что, безусловно, увеличивает его проводящую способность. Как указывалось выше, на ВАХ контактов с защищенной SiO_2 периферией это проявляется в полном отсутствии токов утечек (ступенек) (рис. 1, кривая 3), что, согласно [3,4], указывает на отсутствие области с локальным понижением потенциального барьера. Таким образом, включение защищенного SiO_2 по периферии контакта выглядит проще. Проводимость контакта по площади также неоднородна — имеются аналогичные локальные участки с минимальной и максимальной проводимостью. При подаче на контакт прямого или обратного смещения происходит постепенное включение участков локальной проводимости и в конечном итоге всей площади контакта. Участки с максимальной проводимостью включаются раньше. По мере увеличения смещения количество включенных локальных участков увеличивается и при $|U_r| > 6$ В, а для $|U_f| > 0.2\text{--}0.3$ В практически вся площадь защищенного контакта становится проводящей. При прямом смещении характер распределения токов растекания по площади защищенного контакта аналогичен характеру распределения при обратном смещении — отсутствует высокопроводящая периферийная область.

4. Обсуждение результатов

Поведение токов растекания свободных (не защищенных по периферии пленкой SiO_2) контактов при обратных смещениях укладывается в рамки обычных представ-

лений. Хорошо известно, что напряженность электрического поля на острых углах различных конструкций тем больше, чем меньше радиус их закругления. К таким острым углам можно отнести и контактирующий с полупроводником край барьерного контакта. Из рис. 9, а и рис. 2, с (указано стрелками) видно, что по периферии контакта КРП, а значит и потенциал, претерпевают наиболее сильные изменения, что как раз и говорит о повышенной напряженности электрического поля в этой области. В результате барьер вблизи его вершины по периферии контакта будет значительно тоньше, что приводит к уменьшению эффективной высоты барьера за счет полевой эмиссии носителей (туннелирование через вершину барьера). Локальное уменьшение эффективной высоты барьера по периферии контакта и приводит к увеличению периферийных токов, которые на прямых ветвях ВАХ свободных контактов проявляются в виде ступенек. По мере увеличения обратного смещения происходит общее (как по периферии, так и по основной площади контакта) утончение барьера [28]. При достаточно больших $|U_r|$ максимум плотности обратного полевого тока $J(q\phi)$ по периферии и основной площади контакта практически приближается к уровню Ферми металлического контакта [28], в результате чего происходит выравнивание периферийных токов и токов основной площади контакта. Таким образом происходит включение свободного контакта при подаче обратного смещения с точки зрения его энергетической диаграммы.

Включение свободного контакта при подаче прямого смещения происходит по другому механизму. При увеличении прямого смещения происходит уменьшение протяженности области пространственного заряда, увеличение ширины барьера и уменьшение его высоты относительно уровня Ферми полупроводника [28]. Это приводит к увеличению термоэмиссионного тока по основной площади контакта. По периферии же контакта, кроме термоэмиссионных токов, будут протекать термополевые токи, обусловленные утончением барьера вблизи вершины и эффективным его понижением за счет повышенной напряженности электрического поля. В результате этого с увеличением прямого смещения плотность периферийных токов будет практически всегда превышать плотность токов, текущих через основную площадь контакта, что мы и наблюдаем в экспериментах по измерению токов растекания (рис. 5). Оценки показали, что текущий по периферии контакта при небольшом прямом смещении суммарный электрический ток практически равен току ступеньки на прямой ВАХ (рис. 1, кривая 1) и составляет $\sim 10^{-8}$ А.

Включение мезаконтакта при подаче прямого или обратного смещений происходит аналогично включению свободного контакта, с тем лишь отличием, что при обратных смещениях отсутствует случай, когда ток течет исключительно по периферии контакта. Так происходит вследствие значительного уширения периферийной области и уменьшения напряженности электрического поля в ней. Область с минимальными значениями

КРП l^{**} меньше диаметра контакта (рис. 9, *b*). Поэтому, несмотря на наличие периферийной области на АСМ-изображении тока растекания, величины реально протекающего по периферии избыточного тока явно недостаточно для искажения ВАХ и образования на ней ступеньки тока. В то же время повышение однородности в распределении КРП контакта приводит к незначитель-

ному уменьшению показателя идеальности n , увеличению высоты барьера (уменьшению токов насыщения J_s) и увеличению последовательного сопротивления R_s .

Использование пластичных золотых контактов, в отличие от используемых в [3,4] жестких палладиевых, сводит к минимуму механические напряжения в системе КМП с БШ как при комнатных, так и при азотных температурах. На это также указывает и отсутствие зависимости ширины периферийной области от диаметра контакта. В то же время толстое (0,5 мкм) диэлектрическое покрытие SiO_2 вокруг защищенного контакта может вызывать заметные механические напряжения. В результате под воздействием сжимающих сил \mathbf{F} в приповерхностной области l^* эпитаксиального слоя $n\text{-GaAs}$ вокруг контакта под воздействием пьезоэффекта [29,30] возникает электрическое поле (рис. 9, *c*, область 2), препятствующее этому сжатию, которое приводит к перераспределению электрических полей в области ореола шириной l с образованием ориентированных по взаимно перпендикулярным направлениям $[011]$ и $[0\bar{1}1]$ лепестков КРП (рис. 4, *b* и рис. 9, *c*, граница областей 1–2). Тот факт, что лепестки потенциала строго ориентированы по кристаллографическим направлениям $[100]$ поверхности GaAs , свидетельствует в пользу их происхождения под воздействием механических напряжений. Известно также, что сжатие GaAs приводит к сужению запрещенной зоны и к понижению барьера, а растяжение, напротив, — к его увеличению. В данном случае уменьшение ширины запрещенной зоны за счет механического сжатия происходит в месте локализации механических напряжений \mathbf{F} и сосредоточено согласно рис. 9, *c* в области 2 под слоем SiO_2 за областью контакта и поэтому не может оказывать влияния на высоту барьера. Максимум потенциала лепестков ($\text{grad}(\varphi) = 0$) приходится на границу контакта, в результате чего электрическое поле в этой области будет равно нулю. Повышенная напряженность электрического поля по периферии контакта смещается за периметр контакта, что и приводит к практически полному исчезновению периферийных токов как при прямом, так и при обратном смещениях. Искривление потенциала поверхности SiO_2 происходит не в результате перераспределения зарядов (пленка SiO_2 — непроводящая), а под воздействием проникающих в пленку SiO_2 электрических полей ореола.

Согласно результатам [17], электрическое поле ореола вокруг металлических контактов с барьером Шоттки (вокруг области пространственного заряда) сформировано не только перепадом потенциала $\varphi(x, y)$ между потенциалом области контакта $\varphi_{\text{Au}}(\text{contact})$ и потенциалом свободной, за пределами ореола, поверхности φ_{GaAs} , о чем предполагалось в [31] (рис. 9, *a*). Направление этого электрического поля таково, что оно экранирует контакт от внешних электронов, т.е. направлено к контакту. Известно, что радиус экранирования Дебая (ширина области пространственного заряда (ОПЗ)) в объеме полупроводника в общей сложности не может превышать нескольких десятых долей микрометра, а на поверхности — нескольких микрометров. Реальные

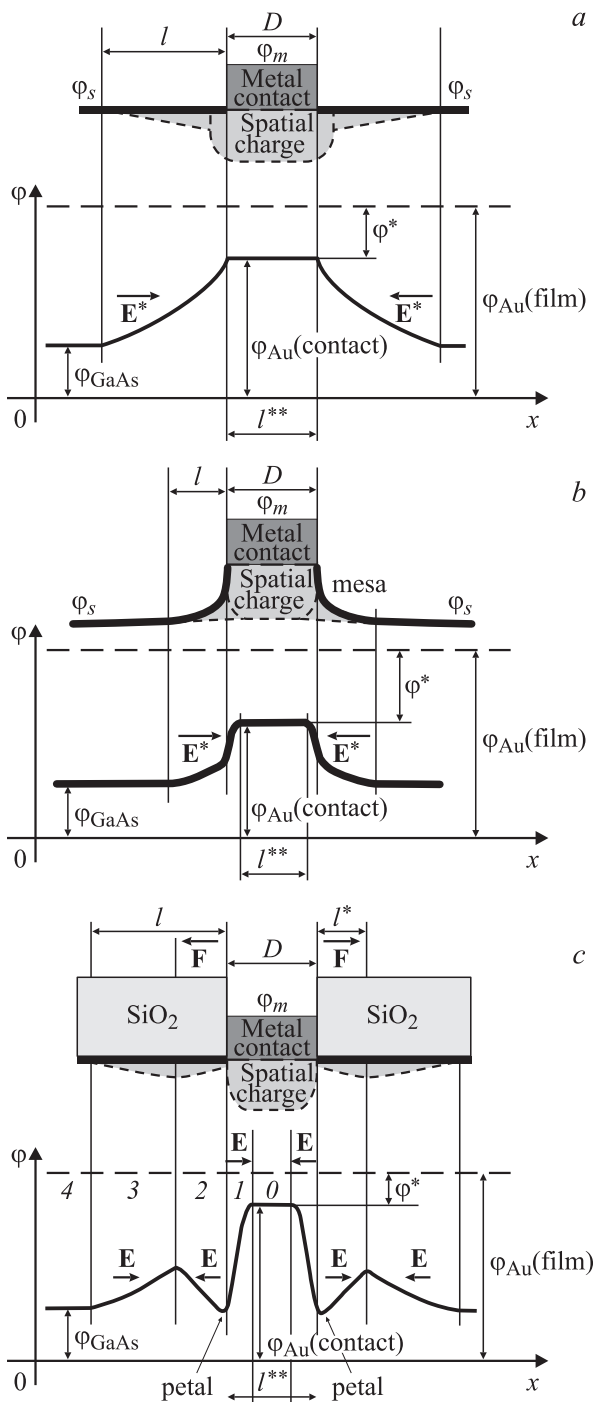


Рис. 9. Схематическое изображение конструкций контактов металл–полупроводник с БШ со своими профилями распределения КРП $\Delta\varphi(x)$: *a* — свободный контакт, *b* — мезакontakt, *c* — защищенный контакт.

же линейные размеры ореола l , согласно полученным результатам и результатам [17,18], в десятки раз превышают размеры ОПЗ и могут достигать десятков микрон (рис. 9, a). В [17] было показано, что для выполнения теоремы Остроградского–Гаусса в системе контакта металл–полупроводник с БШ необходимо введение дополнительного некомпенсированного электрического поля E^* , поток вектора смещения которого через боковую поверхность ОПЗ по периферии контакта дополняет поток вектора смещения электрического поля между барьерным контактом и ОПЗ. Это электрическое поле направлено от контакта и поэтому затягивает внешние (за пределами ОПЗ) электроны, что и приводит к наблюдаемому увеличению ширины ореола l . Напомним, что теорема Остроградского–Гаусса устанавливает равенство между полным потоком вектора смещения электрического поля через замкнутую поверхность и заключенным внутри этой поверхности электрическим зарядом. В [17] было показано, что имеющегося потока вектора смещения электрического поля между ОПЗ и барьерным контактом для выполнения этой теоремы абсолютно недостаточно. В результате электрическое поле ореола сформировано суперпозицией электрического поля, образованного градиентом потенциала между областью контакта и свободной поверхностью, и противоположно направленным ему некомпенсированным по периферии полем E^* электрического заряда ОПЗ. Понятно, что E^* будет уменьшать градиент потенциала в области ореола и увеличивать протяженность l . При этом оно будет формировать некий дополнительный потенциал φ^* , влияющий на потенциал металлического контакта (рис. 9). Согласно [17], измеряемая КРП поверхности контакта с учетом φ^* будет определяться как

$$\Delta\varphi_{s(m)} = \varphi_p - \varphi_{s(m)} - \varphi^*, \quad (6)$$

$$\varphi_m \equiv F_m = \varphi_p - \Delta\varphi_m - \varphi^*. \quad (7)$$

Известно [17,18], что КРП поверхности сплошной электрохимически осажденной пленки золота находится на уровне $\Delta\varphi \approx -0.2$ В, что полностью соответствует КРП системы W_2C/Au и дает значение работы выхода золота, близкое к известному $q\varphi_{Au}(\text{film}) \approx 5.12$ эВ. В [17] было показано, что наличие границы на золотых контактах значительно изменяет их КРП и работу выхода, которая отличается от работы выхода сплошной пленки золота. В [17,18] было показано: чем меньше диаметр и толщина контакта (больше влияние периферии), тем это изменение более значительно, а протяженность ореола l меньше. С увеличением диаметра и толщины влияние границы уменьшается и КРП такого золотого контакта приближается к КРП сплошной золотой пленки [17]. Протяженность ореола l с увеличением диаметра контакта увеличивается. Согласно [17], величина необходимого дополнительного потока E^* и, следовательно, дополнительного потенциала φ^* в общем случае зависит от полного электрического заряда ОПЗ под контактом, который определяется концентрацией легирующей примеси в полупроводнике, высотой потенциального барьера и размерами металлического контакта.

Ввиду одинаковых размеров контактов и параметров материала (концентрация и толщина эпитаксиального слоя n -GaAs) изменение φ^* (для свободного контакта $\varphi^* = \varphi_{Au}(\text{film}) - \varphi_{Au}(\text{contact}) = 5.12 - 4.702 = 0.418$ В) в данном случае будет зависеть от характера распределения дополнительного потока E^* по периферии контакта, который, как было показано выше, определяется конструкцией контакта (наличие мезы или защитного диэлектрического слоя SiO_2 по периферии). Поэтому формирование мезы приводит к перераспределению потока вектора E^* с увеличением его напряженности вблизи контакта и уменьшением ширины ореола l , что, согласно (6), приводит к уменьшению $\varphi_{Au}(\text{contact})$ и увеличению φ^* : $\varphi^* = 5.12 - 4.332 = 0.788$ В (рис. 9, b). Наличие диэлектрической пленки SiO_2 по периферии контакта, напротив, уменьшает напряженность E^* по периферии контакта и увеличивает протяженность области ее изменения l , что и приводит к увеличению $\varphi_{Au}(\text{contact})$ (7) и уменьшению φ^* : $\varphi^* = 5.12 - 4.802 = 0.318$ В (рис. 9, c).

5. Заключение

Исследование методом Кельвина атомно-силовой микроскопии электростатического потенциала поверхности золотых контактов с барьером Шоттки на n -GaAs показало, что вокруг контактов существует протяженная на десятки мкм переходная область (ореол), в которой поверхностный потенциал изменяется от потенциала свободной, за пределами ореола, поверхности n -GaAs до потенциала поверхности золотого контакта. Потенциал свободной поверхности полупроводника (работа выхода электронов) меньше потенциала золотого контакта и в целом соответствует поверхностному потенциалу n -GaAs. Результирующее электрическое поле ореола экранирует контакт и сформировано суперпозицией противоположно направленных электрических полей электрического заряда ОПЗ, которое направлено от контакта, и электрического поля, образованного градиентом потенциала ореола, которое направлено к контакту.

Показано, что потенциал контакта и распределение потенциала в окружающем его ореоле определяются конструкцией контакта металл–полупроводник. АСМ-исследования токов растекания показали, что за счет сильных электрических полей ореола по периметру контакта существует высокопроводящая область (периферия) размером < 0.3 мкм, приводящая к появлению на прямой ВАХ ступеньки тока (токов утечки). Высокая проводимость периферии обусловлена полевой эмиссией электронов через вершину потенциального барьера за счет более высокой напряженности электрического поля по периферии контакта. Остальная область внутри высокопроводящего периферийного кольца, таким образом, является основной площадью контакта. Проводимость основной (внутри периферии) площади контакта обусловлена локальными областями 100–200 нм с повышенной (зерна золотой пленки) и пониженной (границы зерен) проводящими способностями. Формирование вокруг контактов мезы приводит к уменьшению работы

выхода, уменьшению протяженности ореола и напряженности электрического поля в нем, что сопровождается размытием и понижением проводимости периферийной области контакта за счет проникновения электрических полей ореола в область контакта. Это приводит к исчезновению токов утечек на ВАХ и уменьшению показателя идеальности. Защита периферийной области контакта диэлектрической пленкой SiO_2 толщиной 0.5 мкм, напротив, увеличивает работу выхода, что сопровождается перераспределением за счет пьезоэффекта электрических полей и образованием вокруг контакта ориентированных по двум взаимно перпендикулярным кристаллографическим направлениям лепестков потенциала. Более сильное проникновение электрических полей ореола в область контакта приводит к уменьшению показателя идеальности, полному исчезновению высокопроводящей периферийной области и токов утечки на ВАХ.

Различие электрофизических свойств периферии, зерен и их границ определяет механизм включения контакта при подаче прямого или обратного смещений.

Включение свободного контакта при обратном смещении происходит последовательным включением периферии и затем основной площади контакта. По мере увеличения обратного смещения происходит выравнивание проводящей способности периферии и основной площади контакта. При прямом смещении происходит одновременное включение периферии и основной площади контакта. Проводящая способность периферийной области при этом всегда (для любых U_f) остается выше проводящей способности основной площади контакта, что приводит к появлению ступенек (токов утечки) на прямых ВАХ.

Включение мезаконтакта при прямом смещении происходит аналогично включению свободного контакта. При обратном смещении происходит одновременное включение периферии и основной площади контакта. При этом на прямой ветви ВАХ исчезает ступенька тока (токи утечки), происходит уменьшение показателя идеальности n , увеличение ϕ_b и увеличение последовательного сопротивления R_s . Для установления более точной связи электрофизических свойств поверхности с приборными характеристиками КМП с БШ необходимо проведение дальнейших исследований.

Ввиду отсутствия высокопроводящей периферийной области включение защищенного контакта при прямом и обратном смещениях происходит с участием всей площади контакта. Отсутствие периферийной области приводит практически к полному отсутствию токов утечки на ВАХ и увеличению последовательного сопротивления R_s . Сильное проникновение потенциала ореола в область контакта искажает характер распределения высоты потенциального барьера по площади контакта, что приводит к повышению значения показателя идеальности n .

Подводя итог, можно сказать, что описанные в работе электрофизические свойства периферии, оказывающие заметное влияние на токопрохождение в контактах

металл–полупроводник с БШ микрометровых размеров, в процессе токопрохождения через контакты субмикрометровых и нанометровых размеров будут играть определяющую роль.

Использование в качестве барьерного контакта металла с другими механическими свойствами может привести к иному распределению электрических полей в системе КМП с БШ, что должно отразиться и на поведении их ВАХ.

Список литературы

- [1] R. Tung. Mater. Sci. Engin., **R35**, 1 (2001).
- [2] S.M. Sze. *Modern Semiconductor Device Physics* (John Wiley & Sons Inc., 1997).
- [3] В.Г. Божков, О.Ю. Малаховский, А.М. Мисик. Изв. вузов. Физика, **3**, 97 (1983).
- [4] В.Г. Божков, О.Ю. Малаховский, А.Г. Бычков, Е.Г. Сироткин. Изв. вузов. Физика, **5** (190), 14 (1987).
- [5] Р.К. Мамедов. *Периферийные токи и эффективные контактные площади диодов Шоттки* [Вестн. Бакинского ун-та. Сер. физ.-мат. наук (Баку), 2002].
- [6] B.K. Sehgal, S. Mohan, S.H. Mukejee et al. J. Inst. Electron. Telecomm. Engs., **28** (11), 610 (1982).
- [7] В.Н. Андиферов, Ф.Ф. Бездудный, Л.Н. Белянчиков и др. В кн.: *Новые материалы*, под ред. Ю.С. Карабасова (М., МИСИС, 2002).
- [8] T. Sato, S. Kasai, H. Hasegawa. Appl. Surf. Sci., **175–176**, 181 (2001).
- [9] S. Forment, R.L. Van Mairhaeghe, A. De Vrieze, K. Strubbe, W.P. Gomes. Semicond. Sci. Technol., **16**, 975 (2001).
- [10] G.M. Vanalme, L. Goubert, R.L. Van Meirhaeghe, F. Cardon, P. Van Daele. Semicond. Sci. Technol., **14**, 871 (1999).
- [11] M. Yang, J. Lee. ETRI Journal, **24** (6), 455 (2002).
- [12] В.Г. Божков, Н.А. Торхов, И.В. Ивонин, В.А. Новиков. Тез. докл. 19-й Межд. Крымской конф. „СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии“, „КрыМиКо 2009“ (Севастополь, 2009).
- [13] В.Г. Божков, Н.А. Торхов, И.В. Ивонин, В.А. Новиков. Тез. докл. IX Росс. конф. по физике полупроводников „Полупроводники-2009“ (Новосибирск–Томск, 2009).
- [14] В.Г. Божков, С.Е. Зайцев. РЭ, **52** (1), 97 (2007).
- [15] H.O. Jacobs, P. Leuchtmann, O.J. Noman, A. Stemmer. J. Appl. Phys., **84** (3), 1168 (1998).
- [16] В.Г. Божков, Н.А. Торхов, И.В. Ивонин, В.А. Новиков. ФТП, **42** (5), 546 (2008).
- [17] Н.А. Торхов. Изв. вузов. Физика, деп. в ВИНТИ, 334-B2008 от 18.04.2008.
- [18] Н.А. Торхов, В.Г. Божков, И.В. Ивонин, В.А. Новиков. Поверхность, № 11, 1 (2009).
- [19] А.В. Анкудинов, В.П. Евтихийев, К.С. Ладутенко, А.Н. Титков, R. Laiho. ФТП, **40** (8), 1009 (2006).
- [20] Н.М. Коровкина. Автореф. канд. дис. (СПб. гос. электротехнический ун-т „ЛЭТИ“, 2006).
- [21] В.Л. Миронов. *Основы сканирующей зондовой микроскопии* (Н. Новгород, Ин-т физики микроструктур РАН, 2004).
- [22] К.Л. Сорокина, А.Л. Толстихина. Поверхность, № 9, 32 (2006).
- [23] Н.А. Торхов, В.Г. Божков, И.В. Ивонин, В.А. Новиков. ФТП, **43** (1), 38 (2009).

- [24] Н.А. Торхов, В.А. Новиков. ФТП, **43** (8), 1109 (2009).
- [25] Н.А. Торхов, В.Г. Божков. ФТП, **43** (5), 577 (2009).
- [26] А.В. Панин, Н.А. Торхов. ФТП, **34** (6), 698 (2000).
- [27] Ричард Кох. Закон Парето или принцип 80/20. <http://erickson.org.ru/articles/pareto.htm>
- [28] Н.А. Торхов, С.В. Еремеев. ФТП, **34** (1), 106 (2000).
- [29] M.A. Peter, Chien-Ping Lee, Mau-Ching F. Chang. IEEE Trans. Electron. Dev., **ED-31** (10), 1377 (1984).
- [30] J.-C. Ramires, P.J. McNally, S.L. Cooper, J.J. Rosenberg, L.B. Freund, T.N. Jackson. IEEE Trans. Electron. Dev., **ED-35** (8), 1232 (1988).
- [31] Р.К. Мамедов. *Контакты металл–полупроводник с электрическим полем пятен* (Баку, БГУ, 2003).

Редактор Л.В. Шаронова

The influence of periphery of metal-semiconductor contacts with Schottky barriers on their current–voltage characteristics

N.A. Torkhov

Scientific-Research Institute of Semiconductor Devices,
634050 Tomsk, Russia

Abstract The Kelvin study of atomic force microscopy of the surface electrostatic potential of the Schottky barrier golden contacts on *n*-GaAs showed that there was a transition range (halo) extended for tens of micrometers, in which the surface potential changed from *n*-GaAs free surface potential to the golden contact surface potential. The contact potential and potential distribution in the halo around it were defined by the contact structure. The study of spread currents showed that due to strong halo electric fields along the contact perimeter there was a highly conducting area (periphery) resulting in leakage currents. The conductivity of the main contact area was determined by 100–200 nm local areas with excessive and reduced conductance. Mesa formation around the contacts led to reduction of work function, reduction of halo extension and electric-field strength inside it, that was accompanied by smearing and reduction of the contact peripheral contour conductivity. This led to disappearance of the leakage current and decrease of the ideality index. On the other hand protection of the contact peripheral contour with SiO₂ dielectric film 0.5 μm thick increased work function that was accompanied by formation of the potential lobes oriented by two mutually transverse directions around the contact. Prepotent penetration of the halo electric fields into the contact led to reduction of the ideality index, total disappearance of the highly conducting peripheral area and leakage currents. The difference of the periphery electrophysical properties, grains and their boundaries defines the contact switching mechanism while supplying direct or reverse potential.