

Влияние периферии контактов металл–полупроводник с барьером Шоттки на их электрофизические характеристики

© Н.А. Торхов[¶], В.А. Новиков⁺

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

⁺ Томский государственный университет, 634050 Томск, Россия

(Получена 26 февраля 2010 г. Принята к печати 15 марта 2010 г.)

При формировании контакта металл–полупроводник с барьером Шоттки (в виде пленки золота на поверхности арсенида галлия *p*- или *n*-типа проводимости) возникает встроенное в контакт электрическое поле E_l , распространяющееся вокруг контакта на расстояние l (ореол), в десятки раз превышающее размеры области пространственного заряда. Это поле понижает электростатический потенциал φ_{Au} контакта на значительную величину φ^* . Размер ореола l и величина понижения электростатического потенциала φ^* в общем случае определяются величиной и знаком заряда в области пространственного заряда, которые зависят от диаметра D контакта, а также концентрации и типа проводимости полупроводника. Для контактов с барьером Шоттки Au/*n*-GaAs уменьшение D приводит к возрастанию роли периферии, что проявляется в увеличении φ^* , а также в уменьшении φ_{Au} и l . Для контактов Au/*p*-GaAs уменьшение D приводит к уменьшению влияния периферии, что проявляется в уменьшении φ^* , увеличении φ_{Au} и l . Отсутствие области пространственного заряда в контактах МДП приводит к тому, что размер ореола l и величина φ^* не зависят от их диаметров.

1. Введение

В работе [1] было показано, что периферия контакта металл–полупроводник с барьером Шоттки (БШ) приводит к образованию вокруг контакта экранирующего электрического поля E_l , вектор напряженности которого для системы Au/*n*-GaAs направлен к контакту, а его модуль определяется типом металлизации и размерами (диаметром и толщиной) контакта, а также степенью легирования полупроводника. В [1,2] было показано, что это экранирующее поле может распространяться по поверхности вокруг контакта на расстояния, в десятки раз превышающие протяженность области пространственного заряда (ОПЗ) в объеме полупроводника. Проникая в область контакта, это электрическое поле значительно изменяет его электростатическую систему. Так, для системы Au/*n*-GaAs направление вектора напряженности этого поля в области контакта совпадает с направлением вектора напряженности электрического поля ОПЗ, поток вектора смещения которого через площадь контакта приводит к значительному уменьшению его поверхностного потенциала (работы выхода электронов). В [2] было показано, что встроенное электрическое поле E_l , образованное периферией контакта, оказывает сильное влияние и на процесс токопрохождения в контактах металл–полупроводник с БШ.

Данная статья является продолжением работы [1] и содержит новые результаты по исследованию влияния периферии на электростатическую систему металлических контактов с БШ на полупроводниках *n*- и *p*-типа проводимости, а также контактов металл–диэлектрик–полупроводник (МДП).

2. Методическая часть

Методами атомно-силовой микроскопии (АСМ) исследовались контакты с БШ, сформированные электрохимическим осаждением Au на поверхность арсенида галлия *n*- и *p*-типа проводимости (Au/*n*–*n*⁺⁺-GaAs(100) и Au/*p*⁺–*p*⁺⁺-GaAs(100) соответственно). Для арсенида галлия *n*-типа проводимости толщина эпитаксиального слоя (базы) с концентрацией мелкой донорной примеси $N_D = 6 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$ составляла $d = 0.3 \text{ мкм}$. Для *p*⁺-GaAs концентрация акцепторов в эпитаксиальном слое толщиной $d = 3 \text{ мкм}$ составляла $N_A = 5 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$. Полупроводниковые структуры проходили стандартный технологический маршрут обработки, соответствующий подготовке поверхности перед формированием контактов с БШ и включающий: 1) предварительную химическую очистку путем последовательных обработок в моноэтаноламине (C_2H_2ON), диметилформамиде (C_3H_7OH) и изопропиловом спирте (C_3H_7OH); 2) удаление собственных оксидов в растворе $H_2SO_4:H_2O = 1:10$ в течение 30 с с последующей промывкой в деионизированной воде (декапировка); 3) пиролитическое осаждение на поверхность эпитаксиального слоя GaAs диэлектрической пленки диоксида кремния SiO_2 толщиной 0.5 мкм; 4) формирование омического контакта со стороны подложки электрохимическим осаждением сплава AuGe (0.2 мкм) с последующим отжигом в атмосфере водорода в течение 5 мин при температуре 420°C и последующее осаждение слоя золота толщиной 0.2 мкм; 5) защита омического контакта химически стойким лаком (ХСЛ); 6) удаление SiO_2 в травителе HF : NH₄F : H₂O = 90 : 690 : 186 об%; 7) декапировка поверхности GaAs; 8) электрохимическое осаждение пленки золота Au толщиной ~ 0.2 мкм; 9) формирование

[¶] E-mail: trkf@mail.ru

фоторезистной маски на поверхности золотой пленки в виде кругов диаметрами $D = 5–500$ мкм; 10) гравировка золота 0.2 мкм по маске фоторезиста; 11) удаление фоторезиста и ХСЛ.

Кроме контактов с БШ Au/GaAs, в работе исследовались и контакты МДП (металл–диэлектрик–полупроводник) на основе системы Au/SiO₂/n-GaAs. Контакты МДП изготавливались после технологической операции 3 (см. выше) методом взрывной литографии термическим напылением пленок ванадия (V) 0.05 мкм и золота (Au) 0.2 мкм в окна фоторезиста и его последующего растворения (взрыва) в диметилформамиде.

С целью получения дополнительной информации ACM-исследованиям подвергались свободные поверхности эпитаксиального арсенида галлия, n- и p⁺-GaAs, после проведения финишной обработки, а также поверхности вырожденного эпитаксиального арсенида галлия, n⁺-GaAs, с концентрацией доноров $N_D = 2 \cdot 10^{18}$ см⁻³, и слиточного арсенида галлия, p⁺⁺-GaAs, с $N_A \approx 10^{19}$ см⁻³ после химико-динамической полировки и хранения на воздухе при комнатной температуре.

Кроме полупроводниковых, исследовались также и поверхности тонких (~ 0.2 мкм) пленок золота, осажденных электрохимически на поверхность вырожденного арсенида галлия n- и p-типа проводимости — n⁺⁺- и p⁺⁺-GaAs.

ACM-исследования поверхности проводились с использованием промышленного атомно-силового микроскопа „Solver-HV“, позволяющего измерять рельеф поверхности $h(x, y)$, фазовый контраст $\theta(x, y)$ и распределение контактной разности потенциалов (КРП)

$$\Delta\varphi(x, y) = \varphi_p - \varphi_s(x, y), \quad (1)$$

где φ_p — поверхностный потенциал острия иглы кантителевера (зонда), а φ_s — потенциал исследуемой поверхности [3,4] (для поверхности арсенида галлия $s \equiv$ GaAs, а для поверхности золота $s \equiv$ Au). Измерив КРП и зная работу выхода материала иглы кантителевера, нетрудно определить и потенциал (работу выхода) исследуемого участка поверхности как

$$\varphi_s(x, y) = \varphi_p - \Delta\varphi(x, y). \quad (2)$$

ACM-измерения проводились на воздухе в полуконтактном режиме, с использованием двухпроходной методики, с разрешением 256×256 точек (пикселей). Для работы в полуконтактном режиме использовались кантителеверы марки NSG10 (рис. 1, a), представляющие собой микромеханическое устройство, состоящее из кремниевой прямоугольной балки шириной 35, длиной 142 и толщиной 1.5 мкм, закрепленной на массивном кремниевом основании. Собственная частота механических колебаний балки составляла $\omega_z = 220$ кГц. На свободном конце балки со стороны нижней плоскости было сформировано острие высотой 11.5 мкм, с основанием 4×4 мкм и радиусом закругления $r = 30$ нм, покрытое слоем карбида вольфрама (W₂C) толщиной 30 нм,

работа выхода которого равна 4.902 эВ [5–7]. Согласно [5,8], влияние на чувствительные элементы конструкции кантителевера (основание иглы и ее боковую поверхность, выступающие части несущей балки) потенциала окружающего иглу участка поверхности, способное исказить результаты измерения КРП, не превышало 25% в точке соприкосновения острия иглы с поверхностью (так называемое „приборное влияние“) и 2.5% на расстоянии 2 мкм.

Для определения разрешающей способности метода Кельвина в данной работе использовались тонкие золотые пленки с толщинами $h = 50–2000$ нм, полученные электрохимическим осаждением на низкоомную подложку n⁺⁺-GaAs(100). Размеры зерен, образующих эти пленки, в зависимости от толщины h изменялись от 20 до 1000 нм. При этом, как было показано в [1,5], различие в КРП зерен и их границ (контраст) может превышать 30 мВ, что позволяет достаточно точно различать на ACM-изображении КРП поверхности форму и относительное расположение отдельных зерен. Определение разрешающей способности осуществлялось постепенным увеличением расстояния Δz между поверхностью и острием кантителевера до полного исчезновения контраста на ACM-изображении, как показано на рис. 1, b для пленки золота толщиной $h = 1.2$ мкм. Хорошо видно, что при $\Delta z = 10$ нм распределение КРП $\Delta\varphi(x)$ практически повторяет рельеф участка размером 10 мкм поверхности $\Delta h(x)$. По мере увеличения расстояния до поверхности Δz происходит постепенное уменьшение контраста КРП, сначала для более мелких зерен, а затем и для более крупных, и при $\Delta z > 1000$ нм контраст КРП практически полностью исчезает. Таким образом с использованием зерен разных размеров экспериментально находилась функция разрешающей способности $R = R(\Delta z)$ данного кантителевера (рис. 1, c).

Из рис. 1, c видно, что функция $R = R(\Delta z)$ имеет три линейных участка (I, II и III), определяющих „слепую“ область для данного кантителевера в зависимости от расстояния до поверхности Δz . Можно предположить, что на поведение $R = R(\Delta z)$ на каждом конкретном участке оказывает влияние свой некий максимальный эффективный размер кантителевера L_{eff} . В качестве значения L_{eff} для каждого участка можно принять максимальное значение R для данного участка. В результате для данного кантителевера получим, что для I участка $L_{\text{eff}} \approx 30$ нм (радиус острия) на расстояниях $\Delta z < 100$ нм, для II — $L_{\text{eff}} \approx 300$ нм при $\Delta z < 400$ нм и для III — $L_{\text{eff}} \approx 2000$ нм (эффективный радиус основания иглы) при $\Delta z < 1000$ нм. Таким образом, видно, что на расстояниях $\Delta z < 100$ нм основным чувствительным элементом является непосредственно острие иглы, для больших Δz к чувствительным элементам можно отнести ее боковую поверхность, а при $\Delta z > 400$ нм к чувствительным элементам можно отнести и ее основание. Таким образом, при используемых в работе $\Delta z < 100$ нм влиянием боковой поверхности иглы и ее основания (приборным влиянием) можно пренебречь.

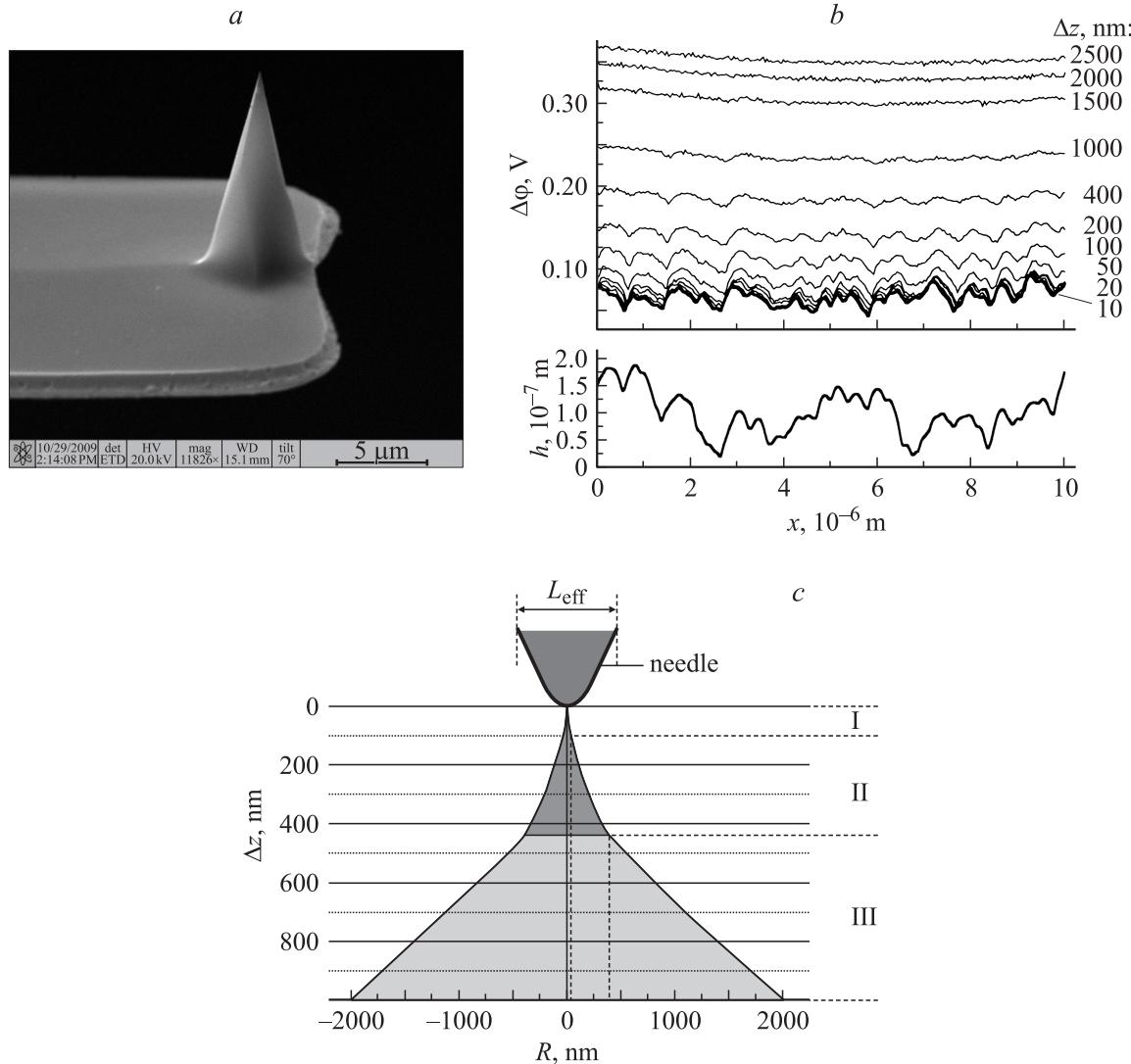


Рис. 1. Изображение в растровом электронном микроскопе иглы кремниевого кантилевера NSG10 с покрытием из карбида вольфрама (W_2C) толщиной 30 нм на балке (a), профили поперечных сечений рельефа $h(x)$ золотой пленки толщиной 1.2 мкм и КРП $\Delta\varphi(x)$ для разных расстояний Δz от поверхности (b), схематическое изображение „слепого“ поля (разрешения R) при измерении КРП методом Кельвина в зависимости от расстояния до поверхности Δz (c).

Измерение рельефа поверхности образца происходило во время первого прохода по сигналу обратной связи, который задавался перемещением кантилевера в плоскости (xy) и изменением амплитуды колебаний иглы по оси z в момент соприкосновения острия с поверхностью. Измерение фазового контраста — сдвига θ фазы колебания балки, вызванного взаимодействием острия иглы с поверхностью, — осуществлялось одновременно с измерением рельефа поверхности [3,4].

Структурный анализ золотых пленок осуществлялся на установке „Quanta-200 3d“ методом дифракции рассеянных электронов (EBSD, electron backscatter diffraction) в автоматическом режиме пошаговым сканированием поверхности с локальным разрешением 200×200 нм.

Измерение статических вольт-амперных характеристик (ВАХ) полученных контактов с БШ Au/GaAs

осуществлялось в автоматическом режиме с использованием механических микроманипуляторов [9].

3. Результаты

3.1. Свободные поверхности

На рис. 2 представлены растровые АСМ-изображения рельефа $h(x, y)$ (a), фазового контраста $\theta(x, y)$ (b) и распределения КРП $\Delta\varphi(x, y)$ (c) поверхности низкоомного эпитаксиального n^{++} -GaAs ($N_D = 2 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$) после эпитаксии и хранения на воздухе со своими профилями поперечных сечений (d). Видимое отсутствие корреляции между изображениями рельефа, фазового контраста и КРП поверхности не подтверждается профилями их поперечных сечений, на которых максимумам рельефа

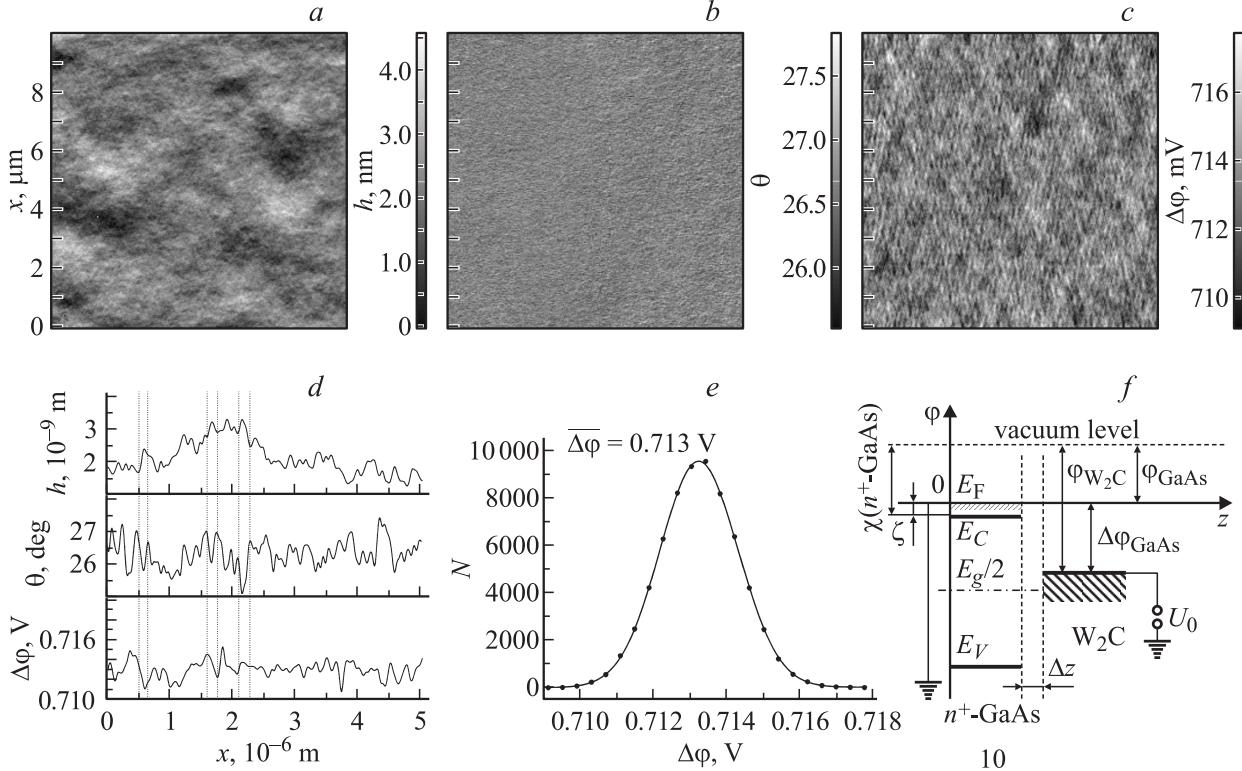


Рис. 2. АСМ-изображения участка 10×10 мкм поверхности вырожденного n^+ -GaAs(100): *a* — рельеф $h(x, y)$; *b* — фазовый контраст $\theta(x, y)$; *c* — контактная разность потенциалов $\Delta\varphi(x, y)$. *d* — профили поперечных сечений $h(x)$, $\theta(x)$ и $\Delta\varphi(x)$; *e* — гистограмма распределения КРП $N(\Delta\varphi)$; *f* — энергетическая диаграмма системы зонд–поверхность, W_2C/n^+ -GaAs (E_F — уровень Ферми, E_C и E_V — соответственно края зоны проводимости и валентной зоны, E_g — ширина запрещенной зоны).

соответствуют минимумы $\theta(x)$ и $\Delta\varphi(x)$. Волнообразный рельеф поверхности характеризуется низкими средними значениями неровности, $\bar{h} = 1.74$ нм, и шероховатости, $\bar{R} = 0.34$ нм, максимальный разброс по высоте составляет $h_{\max} = 4.5$ нм. Фазовый контраст (рис. 2, *b*) в отличие от рельефа более однороден, что соответственно указывает на высокую однородность физических свойств исходной поверхности эпитаксиального n^{++} -GaAs.

Согласно профилям поперечных сечений $h(x)$, $\theta(x)$ и $\Delta\varphi(x)$, наблюдается слабая корреляция КРП исследуемого участка с рельефом и фазовым контрастом (рис. 2, *d*). Максимальный разброс (peak-to-peak) КРП поверхности не превышает 0.0086 В, а среднее значение составляет $\overline{\Delta\varphi}(n^{++}\text{-GaAs}) = 0.713$ В. Однородность фазового контраста, незначительный разброс и практически идеальное гауссово распределение КРП $N(\Delta\varphi)$ (рис. 2, *e*) указывают также и на высокую однородность электрических свойств исходной поверхности. Отдельный интерес представляет абсолютная величина среднего значения потенциала $\bar{\varphi}(n^{++}\text{-GaAs})$ исследуемой поверхности, равная, согласно [4], $\bar{\varphi}(n^{++}\text{-GaAs}) = \varphi_p(W_2C) - \overline{\Delta\varphi}(n^{++}\text{-GaAs}) = 4.902 - 0.713 = 4.189$ эВ. Вследствие высокой концентрации легирующей примеси изгиб зон в приповерхностной области для вырожденного материала n^{++} -GaAs не должен быть значительным, что позволяет не учитывать его в приповерхностной

области и использовать модель плоских зон. С учетом положения уровня Ферми ξ вырожденного полупроводника n -типа проводимости в предположении плоских зон, согласно энергетической диаграмме (рис. 2, *f*), получаем значение электронного сродства эпитетаксиального n^+ -GaAs $\chi = \bar{\varphi}(n^{++}\text{-GaAs}) + \xi = 4.902 - 0.713 + 0.08 = 4.269$ В, что достаточно хорошо согласуется с известным значением 4.170 В [10]. Здесь

$$\xi = \frac{(3\pi^2)^{2/3} \hbar^2 N_D^{2/3}}{2m_n}, \quad (3)$$

где m_n — эффективная масса электрона, N_D — концентрация донорной примеси, \hbar — приведенная постоянная Планка.

Определив значение электронного сродства χ , можно перейти к рассмотрению энергетического состояния поверхности невырожденного арсенида галлия n -типа проводимости.

На рис. 3 представлены АСМ-изображения рельефа $h(x, y)$ (*a*), фазового контраста $\theta(x, y)$ (*b*) и распределения КРП $\Delta\varphi(x, y)$ (*c*) подготовленной для нанесения барьера металлического контакта поверхности невырожденного эпитетаксиального n -GaAs ($N_D = 6 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$) с соответствующими профилями поперечных сечений (*d*). Рельеф поверхности образован

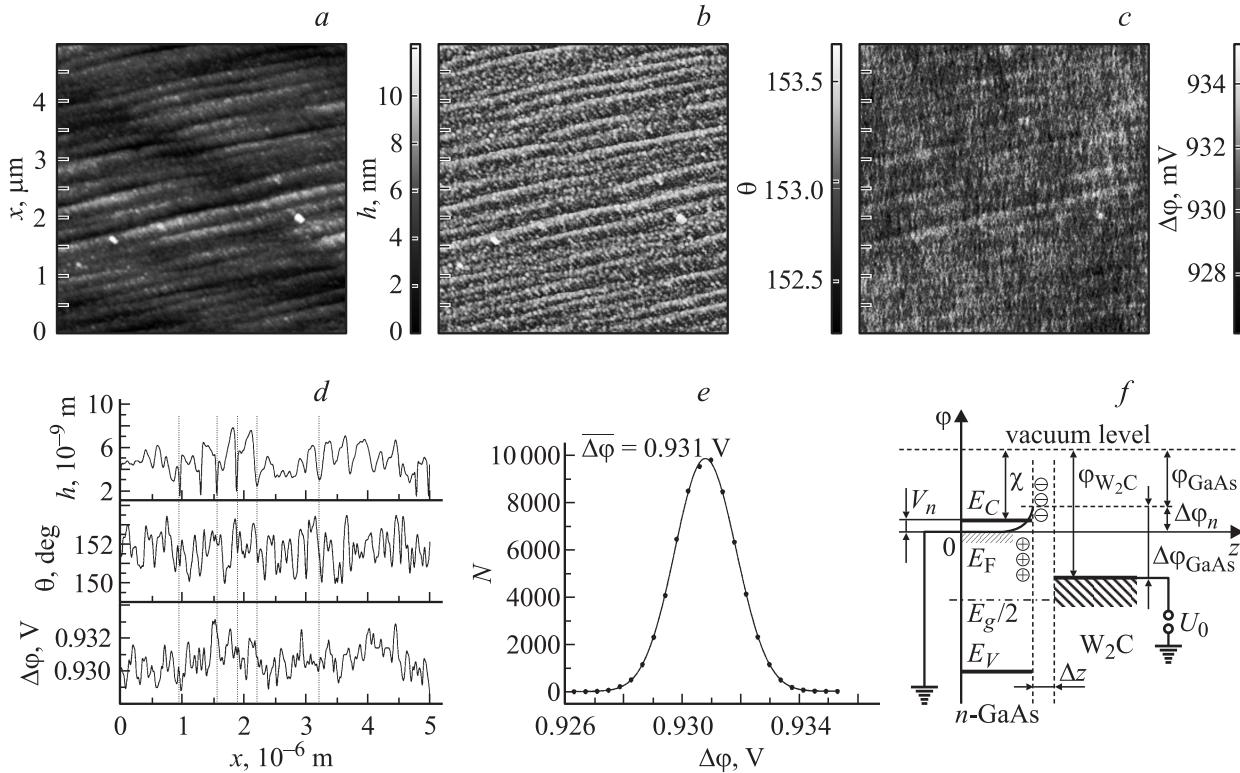


Рис. 3. (а–е) — то же, что на рис. 2, для участка 5×5 мкм поверхности невырожденного n -GaAs(100) после финишной химической обработки (декапировки); *f* — энергетическая диаграмма системы зонд–поверхность, W_2C/n -GaAs.

ступенями роста, которые из-за математической обработки (сглаживания) на растровом изображении видны как поперечные полосы. Рельеф поверхности характеризуется низкими средними значениями шероховатости, $\bar{R} = 1.02$ нм, и неровности, $\bar{h} = 4.8$ нм, максимальная амплитуда которой составляет $h_{\max} = 12.21$ нм. Ввиду неравномерного окисления физические свойства ростовых террас и ступеней неодинаковы, что приводит к различному взаимодействию с ними иглы кантилевера, приводящему к неравномерному сдвигу фазы колебаний иглы кантилевера. В результате на растровом изображении фазового контраста ступени проявляются в виде параллельных полос (рис. 3, *b*).

Неоднородность свойств поверхности и большие размеры неровностей проявляются в виде аналогичных полос и на изображении КРП. Химическая и другие обработки поверхности приводят к заметному увеличению абсолютных средних значений КРП эпитаксиального n -GaAs — до 0.931 В при максимальном разбросе значений 0.009 В. Характер распределения $N(\Delta\varphi)$ также близок к идеальному, так как хорошо описывается одной функцией Гаусса (рис. 3, *e*). Значительная разность в КРП поверхностей n -GaAs и n^{++} -GaAs может указывать как на изменение электронного состояния поверхности, произошедшее во время технологических обработок, так и на наличие значительного изгиба зон $\Delta\varphi_n$ в приповерхностной области эпитаксиального n -GaAs. Изгиб

зон $\Delta\varphi_n$ на n -GaAs можно определить как $\Delta\varphi_n = \chi + V_n - \varphi_{n\text{-GaAs}} = 4.269 + 0.063 - 3.971 = 0.361$ В (рис. 3, *f*), где $\varphi_{n\text{-GaAs}}$ определяется из выражения (2),

$$V_n = kT \ln \left[\frac{N_C}{n} \right], \quad (4)$$

N_C — плотность состояний в зоне проводимости, n — концентрация электронов, T — температура, k — постоянная Больцмана.

Дополнением к картине поведения уровня Ферми на поверхности эпитаксиального GaAs будут АСМ-изображения рельефа $h(x, y)$ (*a*), фазового контраста $\theta(x, y)$ (*b*) и распределения КРП $\Delta\varphi(x, y)$ (*c*) поверхности исходного слиточного вырожденного эпитаксиального p^{++} -GaAs ($N_A \approx 10^{19}$ см $^{-3}$) (рис. 4) со своими профилями поперечных сечений (*d*). В данном случае наблюдается четкая корреляция между изображениями рельефа и фазового контраста, что подтверждается корреляцией между профилями $h(x)$ и $\theta(x)$ (рис. 4, *d*). Рельеф поверхности более шероховатый, со множеством отдельных выступов высотой до 160 нм и эффективным диаметром до 500 нм. Максимальное и среднее значения неровности составляют $h_{\max} = 165.57$ нм, $\bar{h} = 26.49$ нм и среднее значение шероховатости $\bar{R} = 6.89$ нм. Фазовый контраст (рис. 4, *b*) не однороден — в местах расположения выступов он значительно изменяет свою тональность, что может указывать на присутствие другой фазы.

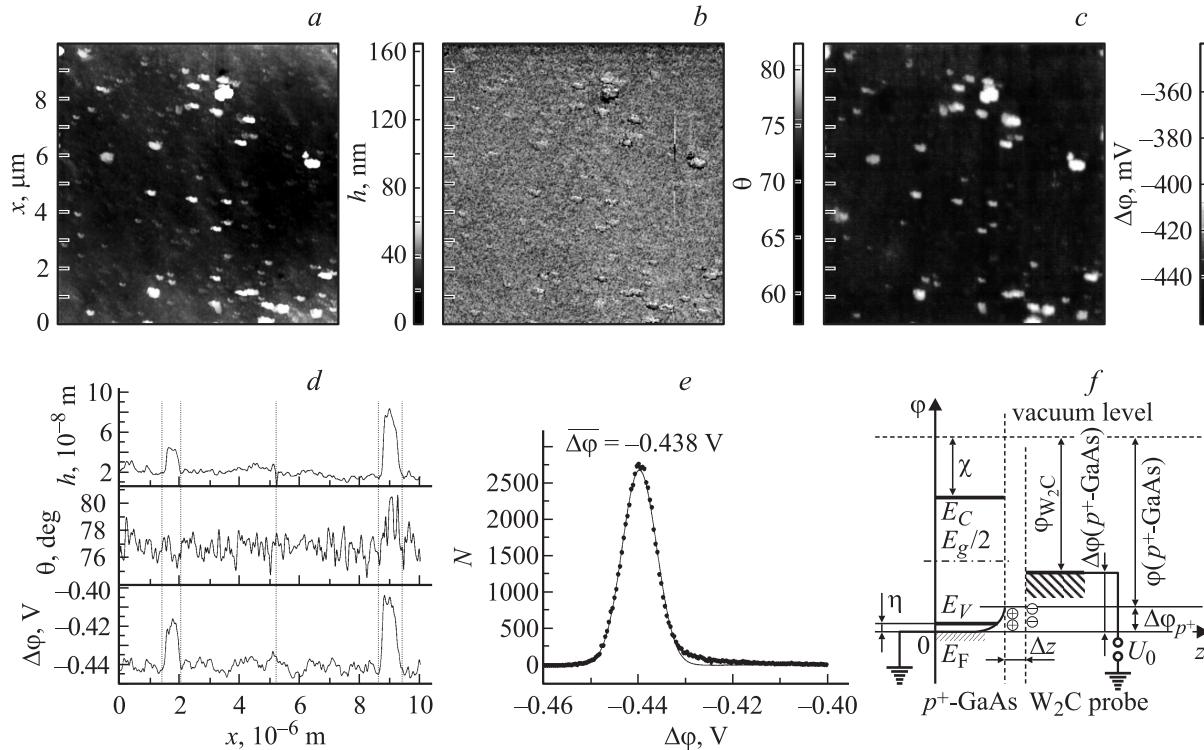


Рис. 4. (а–е) — то же, что на рис. 2, для участка 10×10 мкм поверхности вырожденного p^{++} -GaAs(100); *f* — энергетическая диаграмма системы зонд–поверхность, W_2C/p^{++} -GaAs.

Соответствие неоднородностей КРП неровностям рельефа и неоднородностям фазового контраста указывает на различие электрофизических свойств участков поверхности, образованных неровностями и выступами и по-разному взаимодействующими с кантileвером. Максимумам $h(x)$ соответствуют максимумы на $\theta(x)$ и $\Delta\varphi(x)$ (рис. 4, *c*) и наоборот. Максимальный разброс (peak-to-peak) КРП поверхности в данном случае значительно больше и составляет 0.123 В, а его среднее значение $\overline{\Delta\varphi}(p^{++}\text{-GaAs})$ отрицательно и равно -0.438 В (рис. 4, *e*). Больший разброс и незначительное отклонение КРП от идеального гауссова распределения $N(\Delta\varphi)$ (рис. 4, *e*), по всей вероятности, вызваны неоднородностями локальных участков (выступов), КРП которых превышает основной фон на ~ 100 мВ. Абсолютная величина среднего значения потенциала $\bar{\varphi}(p^{++}\text{-GaAs})$ исследуемой поверхности, согласно (2), равна $\bar{\varphi}(p^{++}\text{-GaAs}) = \varphi_p(W_2C) - \Delta\varphi(p^{++}\text{-GaAs}) = 4.902 + 0.438 = 5.34$ В, что меньше расчетного на $\Delta\varphi_p = E_V - \bar{\varphi}_{p\text{-GaAs}} = \chi + E_g + \eta - \bar{\varphi} = 4.269 + 1.4 + 0.05 - 5.34 = 0.379$ В. Здесь

$$\eta = \frac{(3\pi^2)^{2/3} \hbar^2 N_A^{2/3}}{2m_p}, \quad (5)$$

m_p — эффективная масса дырки. Таким образом, из-за высокой концентрации акцепторной примеси в объеме материала ($N_A \approx 10^{19}$ см⁻³), превышающей, по всей вероятности, концентрацию акцепторных состояний на поверхности вырожденного материала p^{++} -GaAs, бу-

дет наблюдаться изгиб зон, равный $\Delta\varphi_{p^{++}} = 0.379$ В (рис. 4, *f*).

На рис. 5 представлены АСМ-изображения рельефа $h(x, y)$ (*a*), фазового контраста $\theta(x, y)$ (*b*) и распределения КРП $\Delta\varphi(x, y)$ (*c*) подготовленной для нанесения барьера металлического контакта поверхности эпитаксиального p^+ -GaAs ($N_A = 5 \cdot 10^{18}$ см⁻³) с соответствующими профилями поперечных сечений (*d*). Рельеф поверхности эпитаксиального p^+ -GaAs образован ямками округлой формы с эффективным диаметром < 100 нм и глубиной до 10 нм, которые сформировались в местах локальных дефектов в результате предварительного процесса травления подложки в газовой среде перед эпитаксиальным наращиванием. Среднее значение неровностей рельефа составляет $\bar{h} = 19.08$ нм, максимальный перепад по высоте $h_{\max} = 28.45$ нм, а шероховатость $R = 1.98$ нм.

Изображение фазового контраста (рис. 5, *b*) полностью коррелирует с изображением рельефа. Задержка фазы колебаний в местах расположения ямок имеет наибольшее значение, что указывает на более сильное взаимодействие иглы кантileвера с поверхностью

Распределение КРП эпитаксиального p^+ -GaAs очень слабо коррелирует с рельефом поверхности и фазовым контрастом — незначительные увеличения значений КРП наблюдаются только в местах скопления ямок (светлый оттенок), что, согласно (2), соответствует меньшему значению потенциала поверхности (рис. 5, *c*). Небольшой разброс значений КРП и

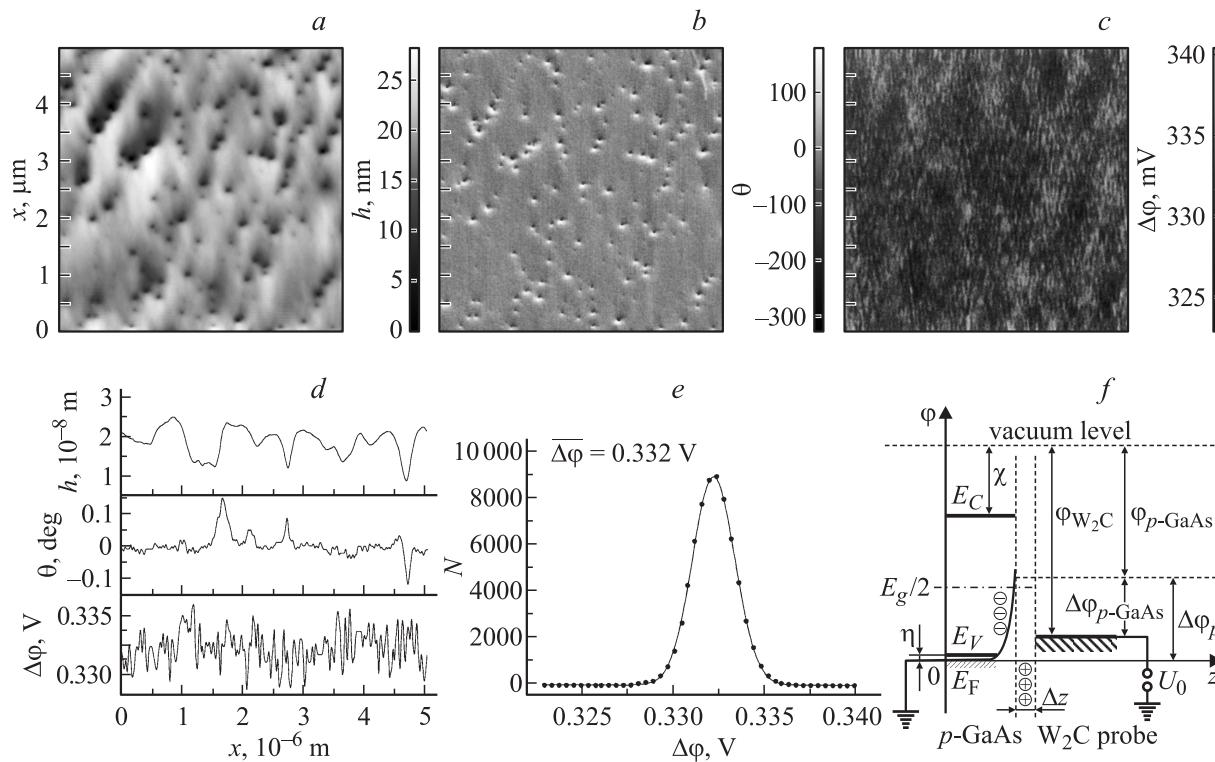


Рис. 5. (а–е) — то же, что на рис. 2, для участка $5 \times 5 \mu\text{м}$ поверхности невырожденного p -GaAs(100); *f* — энергетическая диаграмма системы зонд–поверхность, W_2C/p -GaAs.

отсутствие явной корреляции между КРП и рельефом поверхности (рис. 5, *d*) может указывать на однородность поверхностного потенциала. Точное описание гистограммы распределения КРП $N(\Delta\varphi)$ одиночной функцией Гаусса (рис. 5, *e*) указывает на высокую однородность поверхностного потенциала. Максимальный разброс (peak-to-peak) значений КРП составил 0.018 В, а среднее значение $\overline{\Delta\varphi}(p^+-\text{GaAs})$, в отличие от среднего значения слиточного p^{++} -GaAs, оказалось положительным и равным 0.332 В (рис. 5, *e*). Положительная величина КРП, судя по всему, указывает на наличие сильного изгиба зон $\Delta\varphi_{p^+}$ в приповерхностной области (рис. 5, *f*). Согласно (2), положение уровня Ферми на поверхности, а следовательно, и абсолютная величина среднего значения потенциала есть $\bar{\varphi}(p^+-\text{GaAs}) = \varphi_p(W_2\text{C}) - \overline{\Delta\varphi}(p^+-\text{GaAs}) = 4.902 - 0.332 = 4.57$ В. Это значение меньше соответствующего энергии уровня Ферми в объеме p^+ -GaAs. Таким образом, изгиб зон для эпитаксиального материала p -типа проводимости значительно больше и составляет $\Delta\varphi_p = E_V - \bar{\varphi}_{p-\text{GaAs}} = \chi + E_g + \eta - \bar{\varphi} = 4.269 + 1.4 + 0.048 - 4.57 = 1.147$ В.

Результаты ACM-исследований рельефа (*a*), фазового контраста (*b*) и КРП (*c*) поверхностей золотых пленок толщиной 0.2 мкм, электрохимически осажденных на низкоомные n^{++} - и p^{++} -GaAs, со своими профилями поперечных сечений (*d*) приведены на рис. 6 и 7 соответственно. Во всех случаях можно отметить четко

выраженную корреляцию между рельефом и фазовым контрастом исследуемого участка поверхности, что также видно и из сравнения их контуров поперечных сечений (рис. 6, *d* и рис. 7, *d*). Видно (*a* и *b*), что пленки образованы зернами с эффективным размером 100–500 нм. При этом для системы $\text{Au}/p^{++}\text{-GaAs}$ (рис. 7, *a* и *b*) зерна имеют округлую форму и практически одинаковы в размерах, в отличие от системы $\text{Au}/n^{++}\text{-GaAs}$ (рис. 6, *a* и *b*), для которой размеры зерен изменяются в гораздо большем интервале и при этом они не имеют правильной геометрической формы. Анализ картин дифракции рассеяния обратных электронов (EBSD) показал, что пленки золота в обоих случаях имеют поликристаллическую структуру, образованную плотно примыкающими друг к другу нанокристаллами золота, размеры и расположение которых совпадают с размерами и расположением зерен (рис. 8, *a*). Согласно результатам EBSD-анализа, кристаллографическая ориентация образующих пленку зерен не произвольна (рис. 8, *b*, вставка — обратная полюсная фигура). Зерна с общим направлением кристаллографической ориентации собраны в скопления, характеризующиеся количеством зерен и типом межзеренных границ (двойниковые и специального типа). Анализ размеров и относительного расположения скоплений показал, что их распределение в зависимости от кристаллографической ориентации носит фрактальный характер, что согласуется с фрактальным рельефом поверхности золотой пленки [1,5,7].

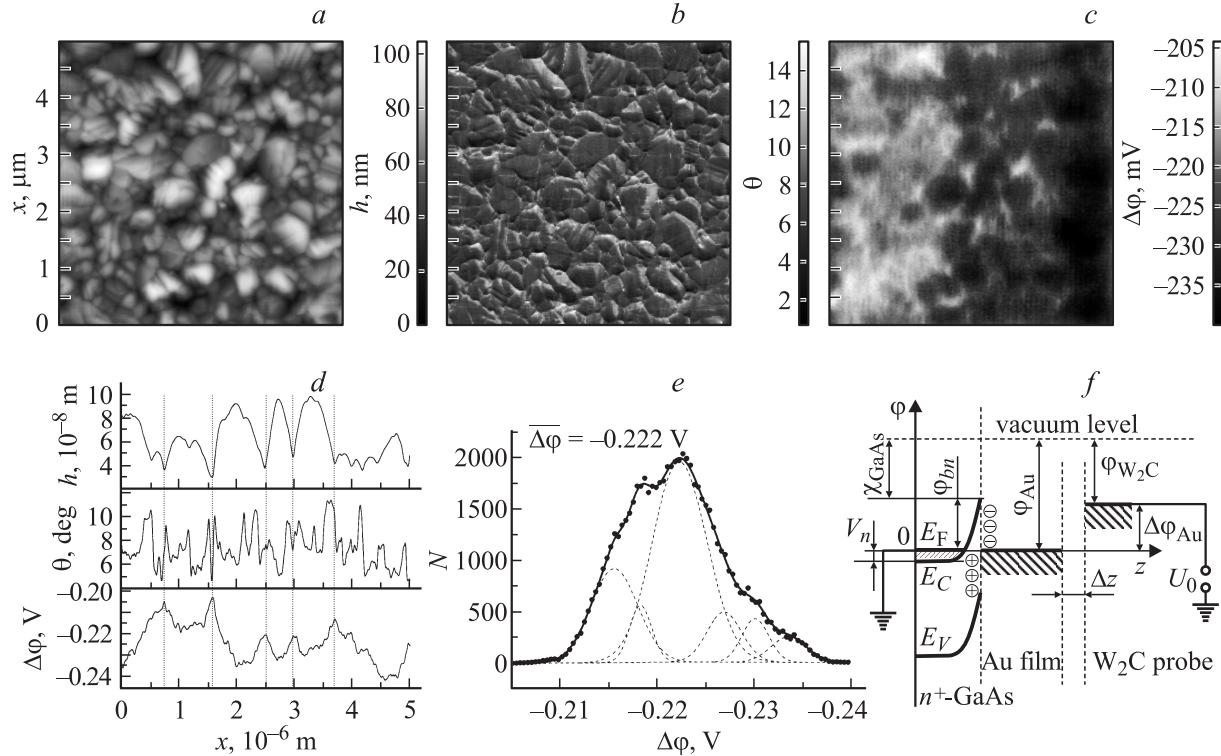


Рис. 6. (а–е) — то же, что на рис. 2, для участка 5×5 мкм поверхности электрохимически осажденной на n^+ -GaAs(100) пленки золота толщиной 0.2 мкм; *f* — энергетическая диаграмма системы зонд–поверхность Au.

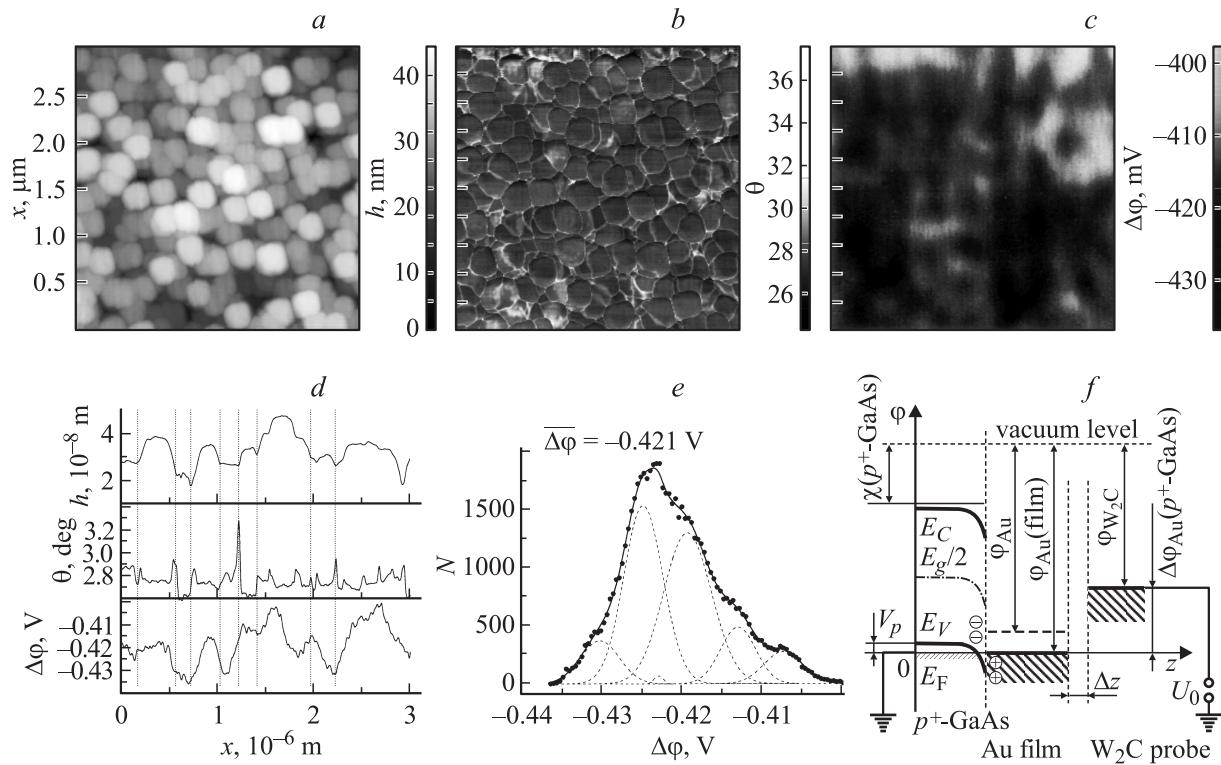


Рис. 7. (а–е) — то же, что на рис. 2, для участка 3×3 мкм поверхности электрохимически осажденной на p^+ -GaAs(100) пленки золота толщиной 0.2 мкм; *f* — энергетическая диаграмма системы зонд–поверхность Au.

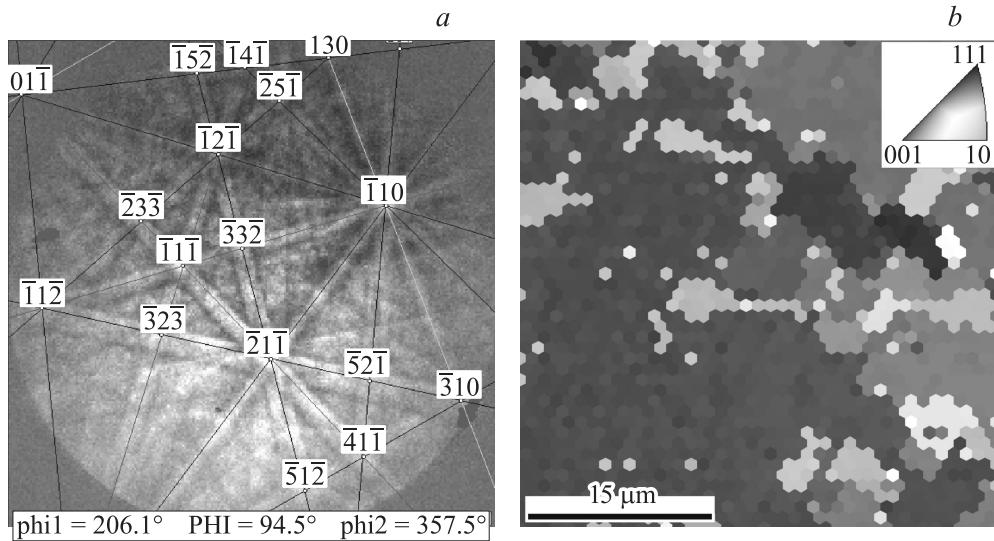


Рис. 8. Изображение кикучи-линий дифракции рассеянных электронов (EBSD) от локального участка 200×200 нм (точки) (а) и распределение локальных участков с одинаковой кристаллографической ориентацией зерен золота, полученное пошаговым сканированием поверхности пленки золота (б). На вставке (б) — обратная полюсная фигура.

Интересными являются данные по распределению КРП $\Delta\varphi(x, y)$ полученных пленок золота (рис. 6, с и рис. 7, с). Из сравнения с с b и d на рис. 6 и 7 видно, что растровые изображения КРП в обоих случаях практически полностью коррелируют с изображениями рельефов и фазовых контрастов. Видно, что поверхности золотых пленок не везде имеют одинаковые значения КРП. Имеются довольно протяженные латеральные участки, образованные скоплениями зерен, которые можно характеризовать одним средним значением КРП. Принимая во внимание результаты EBSD-анализа, можно предположить, что значения КРП латеральных участков поверхности золотой пленки определяются кристаллографической ориентацией внешних граней монокристаллических зерен и видом межзеренных границ. Иными словами, для одних направлений монокристаллов зерен КРП одно, а для других — другое. В результате этого КРП латерального участка будет определяться преимущественной ориентацией монокристаллических зерен. В пользу этого же свидетельствуют и гистограммы распределения КРП $N(\Delta\varphi)$ (рис. 6, е и рис. 7, е), которые, в отличие от полупроводниковой поверхности, для золотых пленок показывают гораздо больший разброс, 0.035 В для Au/n^{++} -GaAs и 0.039 В для Au/p^{++} -GaAs, и описываются не одной, а шестью функциями Гаусса. В этом смысле усредненное по всему участку поверхности значение работы выхода золотой пленки, строго говоря, не является ее однозначной характеристикой. Из рис. 6, с и 7, с видно, что даже в пределах одного участка значение КРП, а следовательно, и поверхностного потенциала неодинаково. Места соприкосновения зерен друг с другом (межзеренные границы) имеют на 20–30 мВ большие значения КРП (меньший потенциал), чем значения КРП их откры-

тых поверхностей. Данное обстоятельство может указывать на существование неоднородности потенциального барьера в местах соприкосновения границ зерен с поверхностью полупроводника в электрических контактах металл–полупроводник с барьером Шоттки. Таким образом, согласно полученным результатам, а также результатам [1, 5, 7], для пленок золота потенциальные неоднородности в областях межзеренных границ могут приводить к локальному увеличению барьера Шоттки.

Отдельного рассмотрения требует природа абсолютных средних значений КРП, а следовательно, и поверхностных потенциалов исследуемых золотых пленок. Согласно энергетической диаграмме (рис. 6, f), для установления равновесия в системе Au/n^{++} -GaAs уровень Ферми $E_F(n^{++}$ -GaAs) в приповерхностной области n^{++} -GaAs должен опуститься до уровня Ферми золотой пленки. В результате того, что $E_F(Au) < E_F(probe)$, измеряемое значение КРП отрицательно, $\Delta\varphi = -0.222$ В, и, согласно (2), имеем значение поверхностного потенциала пленки золота, равное $\varphi_{Au} = 5.12$ В.

Для системы Au/p^{+} -GaAs энергетическая диаграмма другая — уровень Ферми p^{++} -GaAs, $E_F(p^{++}$ -GaAs), ниже уровня Ферми золотой пленки на ~ 0.199 В (рис. 7, f). В этом случае для установления термодинамического равновесия в системе Au/p^{++} -GaAs уровень Ферми золотой пленки должен опуститься до уровня Ферми материала p^{++} -GaAs (рис. 7, f), что приведет к понижению уровня Ферми (увеличению потенциала) и всей поверхности золотой пленки. В результате, согласно рис. 7, f, измеряемое значение КРП пленки золота на p^{++} -GaAs ($\Delta\varphi = -0.421$ В) практически совпадает с КРП свободной поверхности p^{++} -GaAs ($\Delta\varphi = -0.438$ В), а поверхностный потенциал золотой

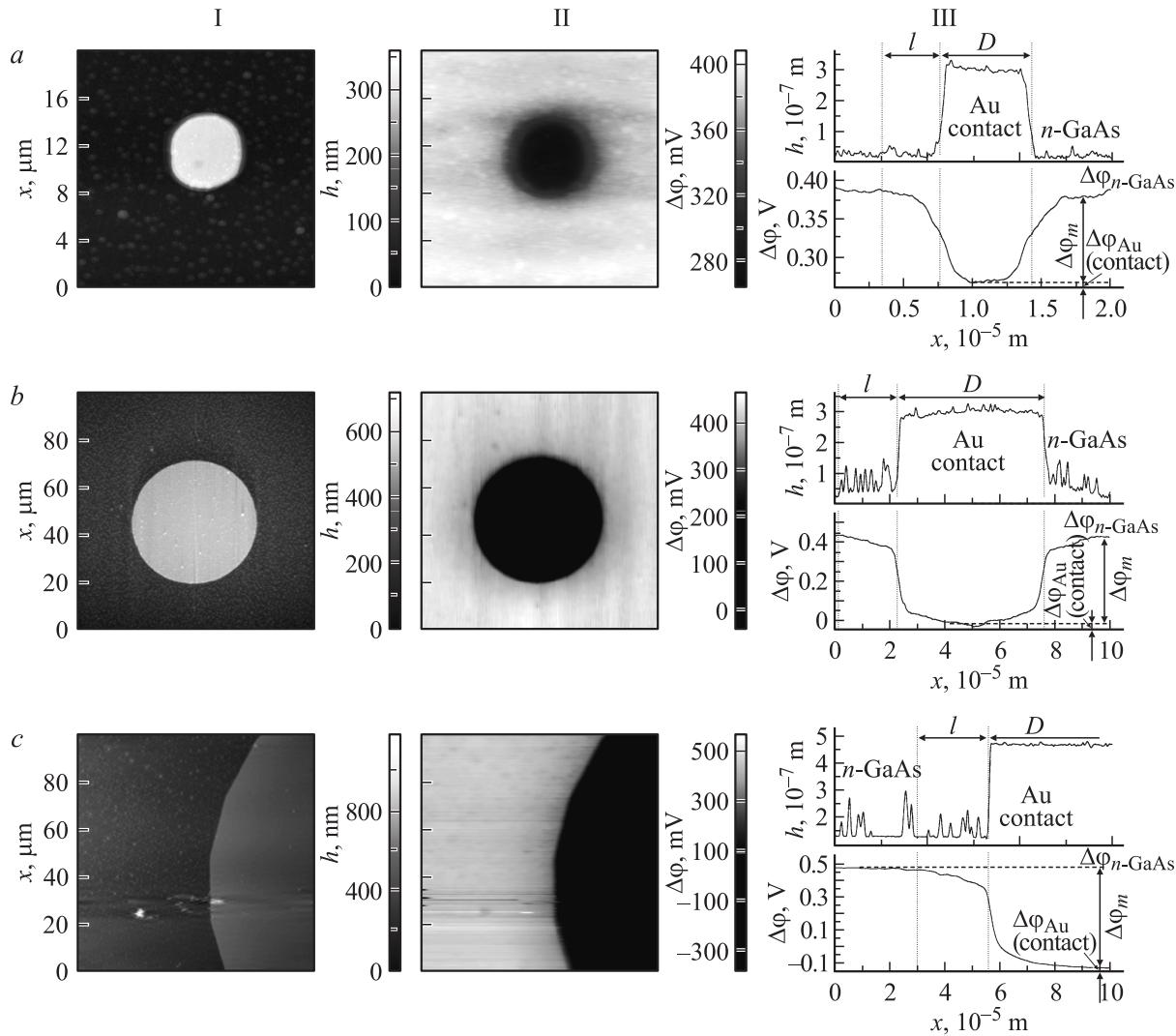


Рис. 9. ACM-изображения рельефа (I), контактной разности потенциалов (II) с соответствующими профилями поперечных сечений (III) участков поверхности n -GaAs, содержащих золотые контакты с барьером Шоттки диаметром $D = 5$ (a), 50 (b) и 500 мкм (c).

пленки на p^+ -GaAs увеличился практически на ту же величину и стал равным $\varphi_{\text{Au}} = 5.323$ В.

Подводя итог описанию поверхностного потенциала эпитаксиальных пленок арсенида галлия, можно заключить, что их потенциалы наnanoуровне связаны с их рельефом, фазовым и химическим составом и в целом соответствуют известным представлениям об энергетическом состоянии арсенидгаллиевой поверхности. Потенциал поверхности тонких, < 0.2 мкм, золотых пленок связан с составом, структурой, размерами и формой зерен и определяется типом проводимости полупроводниковой подложки, на которую они нанесены.

3.2. Контакты металл–полупроводник с барьером Шоттки

На рис. 9 представлены результаты ACM-исследований пространственного рельефа $h(x, y)$ (колонка I), КРП

$\Delta\varphi(x, y)$ (колонка II) поверхности диодных структур $\text{Au}/n-n^{++}\text{-GaAs}(100)$, содержащих круглые Au-контакты диаметрами 5 (a), 50 (b) и 500 мкм (c) с соответствующими профилями поперечных сечений $h(x)$ и $\Delta\varphi(x)$ (колонка III). На ACM-изображениях пространственно-го рельефа четко видны одиночные круглые контакты. Заметно, что морфология поверхности Au-контактов отличается от морфологии поверхности эпитаксиального слоя n -GaAs. Барьерные Au-контакты — достаточно чистые, однородные, с выраженной зернистой структурой, соответствующей зернистой структуре сплошных пленок золота на n^{++} -GaAs.

Особого внимания заслуживают ACM-изображения КРП поверхности эпитаксиального n -GaAs, содержащей барьерные контакты (рис. 9, II). Видно, что измеряемая КРП в области контактов значительно меньше КРП свободной поверхности эпитаксиального n -GaAs за пределами контакта на величину $\Delta\varphi_m$ и зависит от

Параметры контактов Au/GaAs с барьером Шоттки и контактов Au/SiO₂/n-GaAs

| <i>D</i> , мкм | 5 | 15 | 30 | 50 | 100 | 200 | 500 |
|--|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| Au/n-GaAs | | | | | | | |
| $\Delta\varphi_{\text{Au}}(\text{contact})$, мВ | +270 | +230 | +170 | -30 | -70 | -120 | -130 |
| $\Delta\varphi_m$, мВ | 100 | 145 | 260 | 450 | 560 | 600 | 620 |
| <i>l</i> , мкм | 4 | 12 | 16 | 20 | 23 | 24 | 26 |
| $\varphi_{\text{Au}}(\text{contact})$, В | 4.632 | 4.672 | 4.732 | 4.932 | 4.972 | 5.022 | 5.032 |
| φ_m^* , мВ | 492 | 452 | 392 | 192 | 152 | 102 | 92 |
| Au/p-GaAs | | | | | | | |
| $\Delta\varphi_{\text{Au}}(\text{contact})$, мВ | -322 | -320 | -290 | -280 | -180 | -90 | -60 |
| $\Delta\varphi_m$, мВ | 196 | 170 | 160 | 150 | 140 | 130 | 130 |
| <i>l</i> , мкм | 2 | 3 | 3.5 | 4 | 4 | 4 | 4 |
| φ_{Au} , В | 5.224 | 5.222 | 5.192 | 5.182 | 5.082 | 4.992 | 4.962 |
| φ_m^* , мВ | 116 | 118 | 148 | 158 | 258 | 348 | 378 |
| Au/SiO ₂ /n-GaAs | | | | | | | |
| $\varphi_{\text{Au}}(\text{МДП})$, мВ | +770 | +770 | +750 | +765 | +750 | +750 | +760 |
| $\Delta\varphi_m$, мВ | 925 | 930 | 930 | 935 | 925 | 925 | 950 |
| <i>l</i> , мкм | 1.8 | 1.9 | 1.75 | 1.85 | 1.95 | 1.9 | 2 |
| $\varphi_{\text{Au}}(\text{МДП})$, В | 4.145 | 4.140 | 4.140 | 4.135 | 4.135 | 4.135 | 4.132 |
| φ_m^* , мВ | 979 | 984 | 984 | 989 | 989 | 989 | 992 |

его диаметра *D*. Как было показано в [1,2], область наибольшего падения КРП $\Delta\varphi_{\text{Au}}(\text{contact})$ совпадает с областью, занимаемой металлическим контактом. Из рис. 9, II видно, что увеличение диаметра контакта *D* приводит к увеличению

$$\Delta\varphi_m = \Delta\varphi_{n\text{-GaAs}} - \Delta\varphi_{\text{Au}}(\text{contact}), \quad (6)$$

где $\Delta\varphi_{n\text{-GaAs}}$ — значение КРП свободной поверхности эпитаксиального арсенида галлия *n*-типа проводимости (см. таблицу). При этом измеряемое значение КРП контакта $\Delta\varphi_{\text{Au}}(\text{contact})$ значительно меньше значения КРП сплошной пленки золота $\Delta\varphi_{\text{Au}}(\text{film})$. Согласно полученным результатам, при $D \rightarrow \infty$ КРП (поверхностный потенциал $\varphi_{\text{Au}}(\text{contact})$) золотого контакта стремится к КРП (поверхностному потенциальному $\varphi_{\text{Au}}(\text{film})$) сплошной золотой пленки:

$$\varphi_{\text{Au}}(\text{contact}) \xrightarrow[D \rightarrow \infty]{} \varphi_{\text{Au}}(\text{film}). \quad (7)$$

Напомним, что приборное влияние элементов конструкции кантилевера на измерение абсолютного значения КРП не превышает нескольких процентов, тогда как $\Delta\varphi_{\text{Au}}(\text{contact})$ может изменяться в несколько раз и даже изменять знак. При этом вокруг круглых контактов может наблюдаться осесимметричная протяженная переходная область (ореол) шириной *l* с КРП, отличной от КРП свободной поверхности. По мере удаления от периметра контакта значение КРП ореола постепенно увеличивается от минимального, равного КРП поверхности контакта, до максимального, равного КРП свободной полупроводниковой поверхности. Согласно полученным данным, а также результатам [1,5],

ширина ореола также увеличивается с увеличением диаметра контакта от единиц до десятков микрометров (см. таблицу).

Как видно из рис. 10, *a*, полученные контакты имеют достаточно хорошие статические приборные характеристики, соответствующие барьери Шоттки высотой 0.87 эВ, с показателем идеальности *n* = 1.05–1.08, и свидетельствующие о том, что по электрическим свойствам система Au/n-GaAs близка к идеальному контакту Шоттки. В предположении об отсутствии приборного влияния на процесс измерения КРП данное обстоятельство может указывать на то, что ореол и зависимость поверхностного потенциала золотых контактов от их диаметра присущи именно электрическим контактам металл–полупроводник с барьером Шоттки.

На рис. 11 представлены результаты ACM-исследований рельефа (колонка I), КРП (колонка II) исследуемого участка поверхности эпитаксиального *p*⁺-GaAs, содержащей круглые Au-контакты, Au/*p*⁺–*p*⁺⁺-GaAs(100), диаметром 5 (*a*), 50 (*b*) и 500 мкм (*c*), с соответствующими профилями поперечных сечений (колонка III). На ACM-изображениях пространственного рельефа видны круглые контакты, рельеф которых отличается от рельефа поверхности эпитаксиального *p*⁺-GaAs. Барьерные Au-контакты — чистые, достаточно однородные с выраженной зернистой структурой, аналогичной зернистой структуре сплошной пленки золота на слиточном *p*⁺⁺-GaAs.

Значение КРП поверхностей золотых контактов на *p*⁺-GaAs (рис. 11, II), так же как и в случае с золотыми контактами на *n*-GaAs, меньше значения КРП откры-

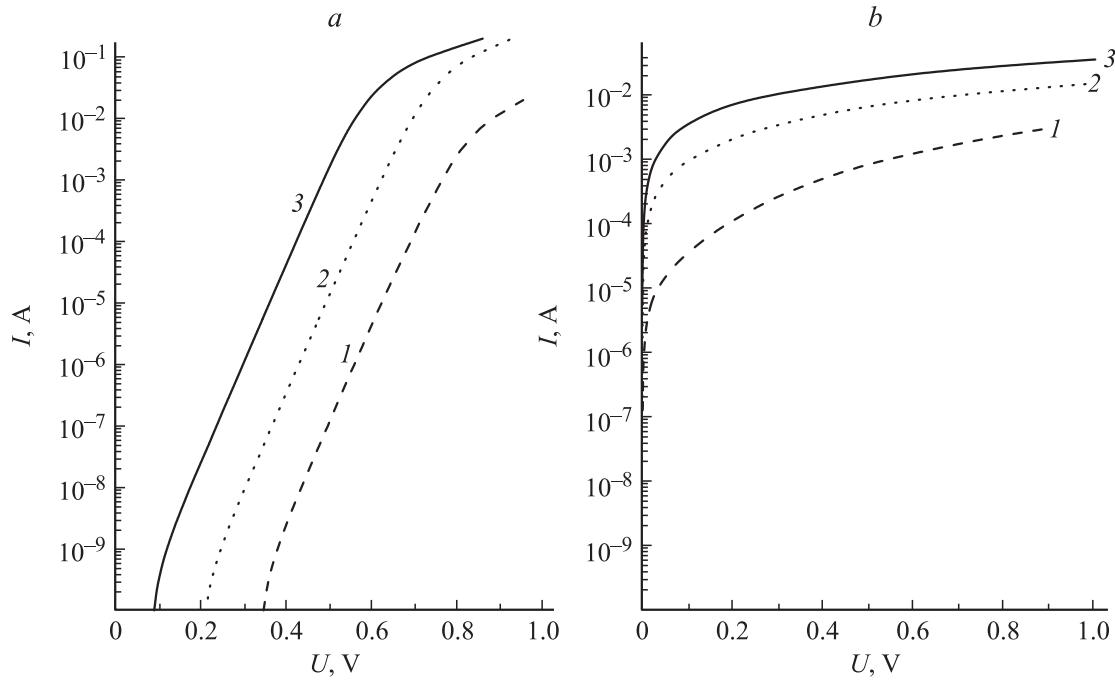


Рис. 10. Прямые вольт-амперные характеристики $I(U)$ контактов Au/ n -GaAs (а) и Au/ p -GaAs (б). $D = 5$ (1), 50 (2), 500 мкм (3).

той полупроводниковой поверхности p^+ -GaAs и также зависит от диаметра контакта D . При этом, кроме общих закономерностей, имеются и значительные отличия (см. таблицу). Так, с увеличением диаметра значение КРП контакта $\Delta\varphi_{\text{Au}}(\text{contact})$ растет и при $D \rightarrow \infty$ стремится к некоторому значению, равному сумме значений КРП (поверхностного потенциала) сплошной золотой пленки на p^{++} -GaAs и некоего дополнительного φ^* . Разность значений КРП $\Delta\varphi_{p\text{-GaAs}}$ свободной поверхности p^+ -GaAs и КРП $\Delta\varphi_{\text{Au}}$ золотого контакта,

$$\Delta\varphi_m(\text{contact}) = \Delta\varphi_{p\text{-GaAs}} - \Delta\varphi_{\text{Au}}(\text{contact}), \quad (8)$$

с увеличением диаметра D , напротив, уменьшается (см. таблицу). Ввиду того что изменение КРП $\Delta\varphi_m(\text{contact})$ в данном случае значительно слабее, ореол l на фоне контактов слабо заметен.

Ввиду того что поверхностные потенциалы (работы выхода электронов) пленки золота на p^{++} -GaAs и эпитаксиальном p^+ -GaAs имеют близкие значения, их электрические контакты при наличии изгиба зон будут иметь пониженную высоту барьера Шоттки, а высокая концентрация ионизованной мелкой акцепторной примеси будет приводить за счет увеличения полевой эмиссии к дальнейшему понижению эффективной высоты барьера. В результате полученные контакты Au/ p^+ -GaAs имеют омические электрические характеристики (рис. 10, б). Слабая выраженность ореола (см. таблицу) и обратная зависимость $\Delta\varphi_m(\text{contact})$ от диаметра контакта указывают на связь этих параметров с величиной и знаком электрического заряда в ОПЗ контакта Au/ p^+ -GaAs.

3.3. Контакты металл–диэлектрик–полупроводник

На рис. 12 представлены АСМ-изображения рельефа $h(x, y)$ (колонка I) и распределения КРП $\Delta\varphi(x, y)$ (колонка II) контактов металл–диэлектрик–полупроводник (МДП) на основе структур золото–(диоксид кремния)–(арсенид галлия n -типа проводимости) (Au/SiO₂/ n -GaAs) со своими профилями поперечных сечений $h(x)$ и $\Delta\varphi(x)$ (колонка III) диаметрами 15 (а) и 500 мкм (б) (АСМ-изображения контактов других диаметров не приведены). Можно сказать, что значения их КРП, а также ширины ореола l в пределах ошибки измерения соответствуют значениям для представленных контактов. Поверхности золотых контактов и арсенида галлия аналогичны по форме рельефа поверхности золотых контактов Au/ n -GaAs с БШ и свободной поверхности эпитаксиального n -GaAs (см. выше).

Интерес представляют распределения КРП поверхности МДП контактов (рис. 12, II). Прежде всего видно, что абсолютные значения КРП золотых контактов и свободной поверхности n -GaAs МДП контактов превышают таковые в случае контактов с БШ (рис. 9, II). Как показали исследования поверхности n -GaAs, это вызвано дополнительным воздействием плазмохимических процессов при нанесении и снятии диэлектрика. Для МДП структур увеличение значений КРП поверхности золотых контактов вызвано влиянием тонкого (0.5 мкм) промежуточного диэлектрического слоя SiO₂. Важной отличительной особенностью является практическое отсутствие зависимости КРП золотых МДП контактов и ширины ореола l от их диаметра. Как показали исследо-

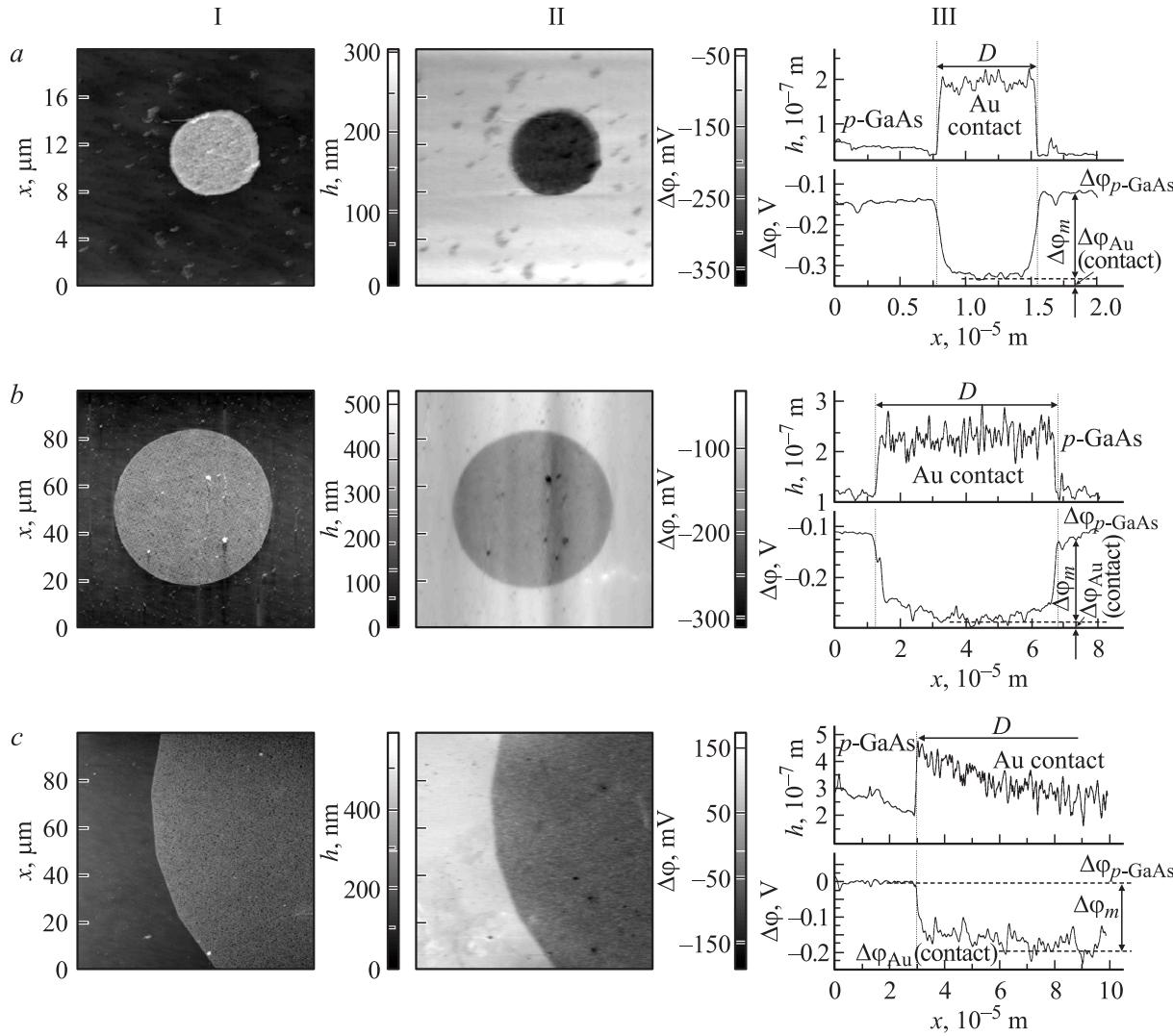


Рис. 11. АСМ-изображения рельефа (I), контактной разности потенциалов (II) с соответствующими профилями поперечных сечений (III) участков поверхности p -GaAs, содержащих золотые контакты с барьером Шоттки диаметром $D = 5$ (a), 50 (b) и 500 мкм (c).

вания для МДП контактов диаметрами 5–500 мкм, значения этих величин остаются постоянными (см. таблицу).

4. Обсуждение результатов

Полученные в работе методом Кельвина значения КРП $\Delta\varphi_{Au}(x, y)$ поверхностей золотых контактов меньше значений КРП свободной полупроводниковой поверхности на величину $\Delta\varphi_m$ (6) и аналогичны КРП золотых контактов, описанных в [1,5]. Выше было показано, что для p^+ -GaAs значения КРП контактов также меньше значений КРП свободной полупроводниковой поверхности (8). Было показано, что для n - и p^+ -GaAs средние значения КРП (поверхностных потенциалов) золотых контактов сильно зависят как от диаметра контактов D , так и от типа проводимости эпитаксиального слоя арсенида галлия (см. таблицу). При этом практически

для всех диаметров контактов средние значения КРП превосходят средние значения КРП сплошных пленок золота аналогичной толщины на величину

$$\begin{aligned} \varphi^* &= \Delta\varphi_{Au}(\text{contact}) - \Delta\varphi_{Au}(\text{film}) \\ &= \varphi_{Au}(\text{film}) - \varphi_{Au}(\text{contact}), \end{aligned} \quad (9)$$

где $\varphi_{Au}(\text{contact})$ — потенциал поверхности золотого контакта, а $\varphi_{Au}(\text{film})$ — потенциал поверхности сплошной пленки золота такой же толщины (рис. 13). Для n -GaAs средние значения $\Delta\varphi_m$ и $\varphi_{Au}(\text{contact})$ достаточно быстро растут с увеличением диаметра контакта D и практически выходят на насыщение (медленно увеличиваются) при $D > 200$ мкм (см. таблицу). Значения КРП контактов $\Delta\varphi_{Au}(\text{contact})$ с увеличением их диаметра уменьшаются. При этом разность потенциалов φ^* , со-

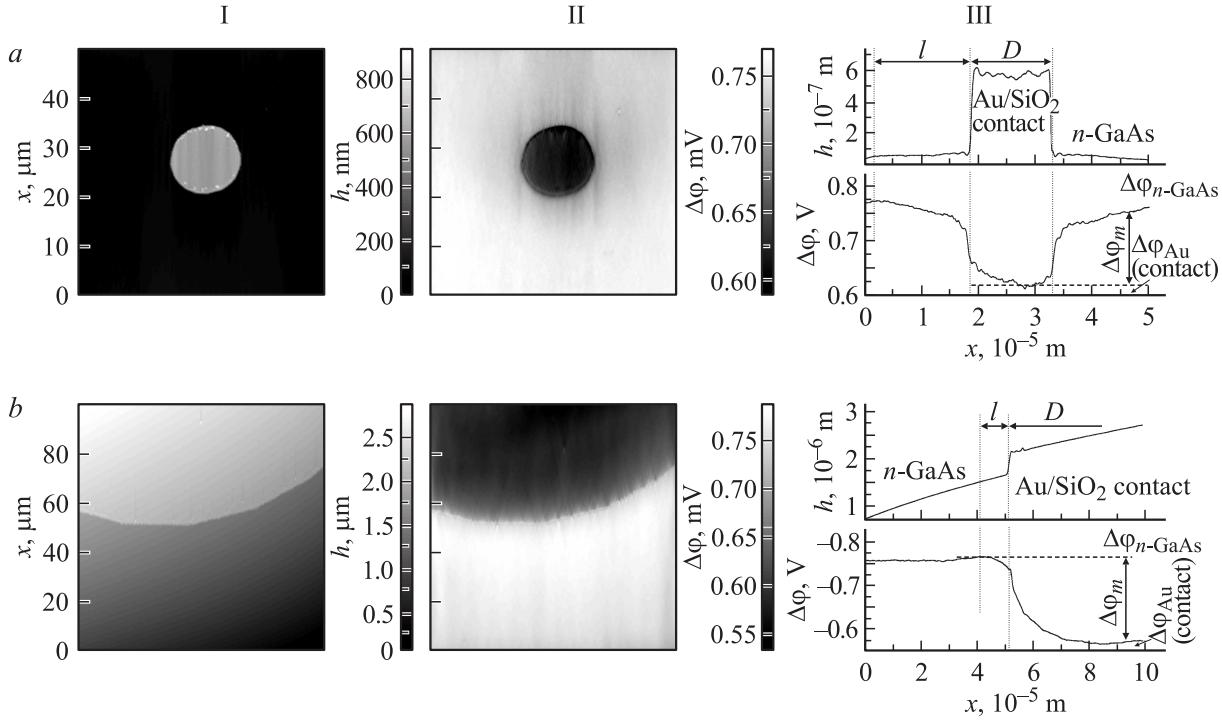


Рис. 12. ACM-изображения рельефа (I), контактной разности потенциалов (II) с соответствующими профилями поперечных сечений (III) участков поверхности $n\text{-GaAs}$, содержащих контакты металл–диэлектрик–полупроводник $\text{Au}/\text{SiO}_2/n\text{-GaAs}$ диаметром $D = 5$ (a) и 500 мкм (b).

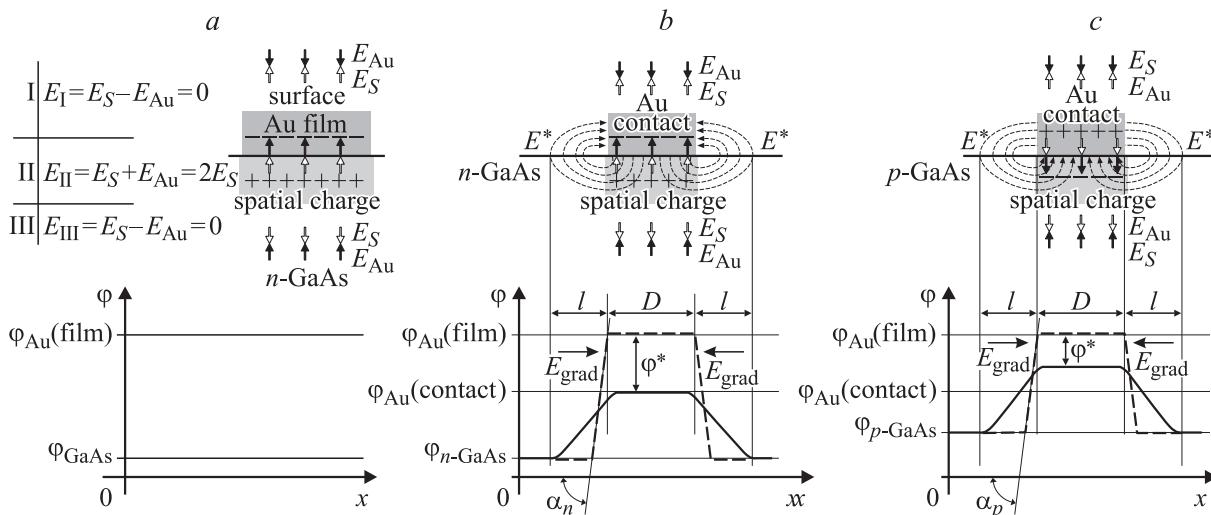


Рис. 13. Энергетические диаграммы сплошной пленки золота на поверхности $n\text{-GaAs}$ (a), контакта $\text{Au}/n\text{-GaAs}$ с барьером Шоттки (b) и контакта $\text{Au}/p\text{-GaAs}$ с барьером Шоттки (c).

гласно (9), также уменьшается и при $D \rightarrow \infty$ $\varphi^* \rightarrow 0$, а $\varphi_{\text{Au(contact)}}$ (КРП $\Delta\varphi_{\text{Au(contact)}}$) приближается к значению $\varphi_{\text{Au(film)}}$ (КРП $\Delta\varphi(\text{film})$) сплошной пленки золота (рис. 9 и таблица). В связи с этим, несмотря на достаточную точность метода, может возникнуть предположение, что увеличение КРП контакта $\Delta\varphi_{\text{Au(contact)}}$ с уменьшением диаметра происходит в результате влияния потенциала свободной поверхности $n\text{-GaAs}$ на выступающие за периметр контакта чувствительные эле-

менты конструкции (балку и основание) кантилевера, которые оказывают так называемое приборное влияние на процесс измерения КРП. Согласно этому предположению, приборное влияние для маленьких контактов должно быть значительно больше, чем для больших, что, возможно, и приводит к увеличению их КРП. Дополнительные исследования показали, что значение КРП контактов с $D < 5$ мкм очень близко к значениям КРП свободной поверхности $n\text{-GaAs}$.

Измерения КРП поверхности золотых контактов Au/ p^+ -GaAs тем же самым кантилевером полностью опровергают сделанное выше предположение. В этом случае мы наблюдаем прямо противоположную зависимость — с уменьшением диаметра D значение $\Delta\varphi_m$ увеличивается, а значение КРП контакта $\Delta\varphi_{\text{Au(contact)}}$ уменьшается, что нельзя объяснить приборным влиянием. Значение $\varphi^* = \varphi_{\text{Au(contact)}} - \varphi_{\text{Au(film)}}$ для p^+ -GaAs (рис. 11) также имеет обратную зависимость — оно увеличивается с увеличением диаметра контакта (см. таблицу). Эксперименты показали, что для золотых контактов на p^+ -GaAs при $D \ll 5$ мкм их среднее значение КРП приближается к некоторому минимальному значению.

На отсутствие приборного влияния при измерении КРП методом Кельвина указывают также и эксперименты по измерению КРП МДП контактов $\Delta\varphi_{\text{Au(MDP)}}$ аналогичных диаметров на основе системы Au/SiO₂/ n -GaAs. Как показали эксперименты, значения КРП таких МДП контактов практически постоянны и не зависят от их диаметра: $\Delta\varphi_{\text{Au(MDP)}} = \text{const}$ и $\Delta\varphi_m(\text{MDP}) = \text{const}$ (рис. 12, таблица).

Объяснить обнаруженные в работе закономерности поведения поверхностных потенциалов золотых контактов можно на основе изложенной в работе [1] теории. В [1,2] было показано, что вокруг контактов металл–полупроводник существует электрическое поле

$$E_{\text{grad}} \propto \text{grad}[\Delta\varphi_m(\text{contact})], \quad (10)$$

образованное градиентом потенциала $\text{grad}(\varphi)$ (рис. 13, *b*, угол α_n , жирная штриховая линия) между поверхностным потенциалом контакта $\varphi_{\text{Au(contact)}}$ и потенциалом свободной поверхности полупроводника $\varphi_{(p)n\text{-GaAs}}$. Ввиду того, что для данной системы КРП контакта всегда меньше КРП свободной поверхности (рис. 13, *b, c*), для полупроводников n - и p -типа проводимости это поле всегда направлено к контакту. Согласно полученным результатам, а также результатам работы [1], кроме E_{grad} вокруг контактов металл–полупроводник с барьером Шоттки существует еще и нескомпенсированное электрическое поле E^* , образованное периферией области пространственного заряда контакта, которое для полупроводника n -типа проводимости направлено от контакта (заряд ОПЗ $Q^+ > 0$), а для полупроводника p -типа проводимости — к контакту (заряд ОПЗ $Q^- < 0$).

Происхождение электрического поля E^* легко понять из рис. 13. На рис. 13, *a* изображено распределение электрических полей вблизи границы Au/ n -GaAs, образованной бесконечной пленкой золота на n -GaAs. Предполагается, что данная двумерная система не имеет границ и занимает всю плоскость (x, y). Светлыми стрелками изображены силовые линии электрического поля E_S положительного заряда ОПЗ полупроводника, а темными — силовые линии электрического поля E_{Au} отрицательного заряда слоя Томаса–Ферми контактирующей с полупроводником пленки золота. Хорошо

видно, что за пределами слоя Томаса–Ферми (рис. 13, *a*, область I) и за пределами ОПЗ (рис. 13, *a*, область III) электрические поля равны по модулю и противоположны по направлению. В результате результирующие поля в областях I и III (рис. 13, *a*) равны нулю. На границе системы, в области II интерфейса (рис. 13, *a*), результирующее электрическое поле максимально, так как электрические поля ОПЗ и слоя Томаса–Ферми сонаправлены. В результате все электрическое поле данной системы сконцентрировано в области границы (интерфейса) бесконечной двумерной системы Au/ n -GaAs.

В случае, если золотая пленка не бесконечна, а ограничена периметром, т. е. имеет периферию, распределение электрических полей будет отличаться от распределения электрических полей в бесконечной плоской системе. Так, в областях I и III над контактом и под ОПЗ электрические поля ОПЗ и слоя Томаса–Ферми по-прежнему будут компенсировать друг друга. За периметром контакта ситуация будет совершенно иной — электрические поля ОПЗ и слоя Томаса–Ферми уже не могут полностью компенсировать друг друга, из-за чего нескомпенсированное электрическое поле E^* (рис. 13, *b*, пунктирные стрелки) будет распространяться в приповерхностной области полупроводника далеко за пределы контакта против электрического поля E_{grad} , изменяя при этом как потенциал полупроводниковой поверхности вокруг контакта (область ореола), так и поверхностный потенциал самого контакта. Механизм этого подробно описан в работе [1].

Таким образом, в результате суперпозиции электрических полей E_{grad} и E^* вокруг контактов металл–полупроводник с БШ существует медленно убывающее и распространяющееся на достаточно большие расстояния от контакта (~ 10 мкм) электрическое поле ореола E_l :

$$E_l(n\text{-GaAs}) = E_{\text{grad}} - E^*. \quad (11)$$

При этом модули $|E_{\text{grad}}| \geq |E^*|$. Большие размеры ореола l , определяющие радиус экранирования на поверхности (радиус Дебая), в десятки раз превышающие размеры ОПЗ в объеме полупроводника, могут объясняться высокой плотностью поверхностных состояний, на которых оседает основное количество подвижных носителей заряда (электронов) поверхности. В результате потери подвижности такие электроны не могут участвовать в перераспределении электрического заряда. Таким образом, в процессе экранирования участвует значительно меньшее количество подвижных электронов, что приводит к значительному увеличению радиуса экранирования на поверхности и соответственно ореола l . Согласно рис. 13, *b, c*, электрическое поле E_l пронизывает всю площадь контакта, уменьшая его потенциал на величину $\varphi^* = \varphi^*(E_l)$ (9). Значение модуля напряженности электрического поля E_{grad} для заданной системы Au/ n -GaAs (или Au/ p^+ -GaAs) постоянно и определяется только разностью потенциалов поверхностей барьера металла и полупроводника. Значение модуля напряженности

электрического поля E^* для заданной системы металл–полупроводник не постоянно, а зависит, как было показано в [1], от общего количества электрического заряда в ОПЗ контакта: чем этот заряд больше, тем значение E^* больше, а E_l , согласно (11), и соответственно $\varphi^*(E_l)$ меньше. В общем случае величина электрического заряда в ОПЗ определяется высотой потенциального барьера φ_b , концентрацией и типом ионизированной легирующей примеси (донарная или акцепторная), а также площадью S контакта. В [1] было показано, что при увеличении диаметра контакта D одновременно с увеличением общего количества заряда в ОПЗ происходит и увеличение E^* . Для полупроводника n -типа проводимости при значительном увеличении диаметра контакта электрическое поле E^* по абсолютной величине будет стремиться к $|E_{\text{grad}}|$. В результате этого электрическое поле ореола E_l (11), а следовательно, и дополнительный потенциал φ^* будут стремиться к нулю, при этом КРП контакта будет стремиться к КРП сплошной пленки золота, что мы и наблюдаем в экспериментах.

Для полупроводника p -типа проводимости электрические поля E^* и E_{grad} в приповерхностной области полупроводника соправлены,

$$E_l(p\text{-GaAs}) = E_{\text{grad}} + E^*, \quad (12)$$

(рис. 13, c) и поэтому увеличение диаметра контакта D и увеличение отрицательного заряда ОПЗ будут приводить только к увеличению электрического поля E^* и, согласно (12), электрического поля ореола E_l и соответственно дополнительного потенциала φ^* , что, как показывает опыт, приводит к увеличению $\Delta\varphi_{\text{Au(contact)}}$ и уменьшению $\Delta\varphi_m$. В этом случае для малых контактов, т. е. при $D \rightarrow 0$, $E^* \rightarrow 0$, а E_l будет стремиться к некоему минимальному значению $E_l \rightarrow E_l(\min) \approx E_{\text{grad}}$, что мы также наблюдаем в эксперименте.

Поведение поверхностного потенциала МДП контактов в зависимости от их диаметра также укладывается в рамки сформированных представлений. Ввиду того что для МДП контактов ОПЗ в полупроводнике отсутствует, а суммарный заряд в приповерхностной области равен нулю (акцепторные состояния сами по себе нейтральны), также будет отсутствовать и нескомпенсированное электрическое E^* поле ОПЗ периферии контакта. В результате электрическое поле вокруг контактов будет образовано в основном электрическим полем E_{grad} и не будет зависеть от диаметра контактов. Соответственно и дополнительный потенциал φ^* также не будет зависеть от диаметра контакта.

5. Заключение

Потенциал свободных поверхностей арсенида галлия n - и p -типа проводимости, а также тонких пленок золота на n^{++} -GaAs и на p^{++} -GaAs в целом укладываются в рамки известных физических представлений об их энергетических состояниях.

Потенциал поверхности вырожденного n^{++} -GaAs с концентрацией подвижных носителей (электронов) $2 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$ равен 4.189 В и с учетом положения уровня Ферми относительно потолка зоны проводимости дает значение электронного сродства 4.269 В. Практическое отсутствие изгиба зон в приповерхностной области вырожденного n^{++} -GaAs указывает на небольшую по сравнению с концентрацией легирующей примеси плотность поверхностных состояний. Для невырожденного n -GaAs значение потенциала поверхности после используемых технологических обработок 3.971 В с учетом положения уровня Ферми соответствует изгибу зон в приповерхностной области 0.361 В.

Для вырожденного p^{++} -GaAs поверхностный потенциал 5.323 В с учетом электронного сродства и положения уровня Ферми относительно дна валентной зоны указывает на наличие изгиба зон в приповерхностной области 0.379 В, что свидетельствует о достаточно высокой по сравнению с концентрацией легирующей примеси плотности акцепторных состояний на поверхности. Для полупроводника p -GaAs значение поверхностного потенциала 4.570 В указывает на значительную величину изгиба зон в приповерхностной области, 1.147 В.

Поверхностный потенциал тонкой пленки золота в двойной системе золото–арсенид галлия определяется положением уровней Ферми золота по отношению к положению уровня Ферми арсенида галлия n - или p -типа проводимости. Уровень Ферми арсенида галлия n -типа проводимости лежит выше уровня Ферми пленки золота. Термодинамическое равновесие в этой системе достигается за счет понижения уровня Ферми n^{++} -GaAs до уровня Ферми золотой пленки, положение которого не изменяется. Именно поэтому поверхностный потенциал золотой пленки в системе Au/ n^{++} -GaAs наиболее точно соответствует собственному поверхностному потенциальному (уровню Ферми) свободного золота (5.124 В). Уровень Ферми p^{++} -GaAs лежит ниже уровня Ферми пленки золота. Термодинамическое равновесие в такой системе достигается за счет понижения уровня Ферми золотой пленки до уровня Ферми p^{++} -GaAs, в результате чего ее поверхностный потенциал (5.323 В) становится практически равным потенциальному поверхности p^{++} -GaAs (5.340 В).

Локализация пленки золота на поверхности арсенида галлия p - и n -типа проводимости путем образования границ (периметра), определяющих геометрические размеры сформированных в плоскости (x, y) контактов, существенно влияет на энергетическое состояние систем Au(contact)/ n -GaAs и Au(contact)/ p -GaAs. Было обнаружено, что граница контакта в обоих случаях приводит к формированию встроенного электрического поля E_l , распространяющегося вокруг контакта на довольно большие расстояния l (ореол) и значительно понижающего электростатический потенциал контакта $\varphi_{\text{Au(contact)}}$ на величину φ^* . Большие размеры ореола l (радиус Дебая) на поверхности арсенида галлия вокруг золотых контактов определяются высокой плотностью

поверхностных (акцепторных) состояний, которые, захватывая подвижные носители заряда (электроны), значительно понижают их концентрацию на поверхности. В результате этого в процессе экранирования участвует меньшее количество подвижных электронов, что приводит к значительному увеличению радиуса экранирования на поверхности и соответственно увеличению размера ореола l . Данное поле \mathbf{E}_l образовано суперпозицией двух электрических полей: электрического поля \mathbf{E}_{grad} , обусловленного градиентом потенциала между потенциалом контакта и потенциалом окружающей контакт свободной полупроводниковой поверхностью φ_{GaAs} , и нескомпенсированным по периферии контакта электрическим полем ОПЗ \mathbf{E}^* , направление и модуль которого определяются величиной и знаком заряда ОПЗ. Направление вектора электрического поля \mathbf{E}_l таково (вектор \mathbf{E}_l направлен к контакту), что оно экранирует область контакта (интерфейс) от внешних электронов. Это позволяет существовать в непосредственном контакте двум термодинамически различным системам: полупроводнику и металлическому контакту. Размеры ореола l и величина понижения электростатического потенциала φ^* определяются величиной и знаком заряда ОПЗ, который зависит от геометрических размеров контакта (в частности от диаметра D), а также концентрации и типа проводимости полупроводника. Для контактов Au(contact)/ n -GaAs с БШ уменьшение диаметра D контакта приводит к увеличению влияния периферии, что проявляется в увеличении φ^* от 0.092 до 0.492 В, уменьшении электростатического потенциала контакта $\varphi_{\text{Au}}(\text{contact})$ от 5.032 до 4.632 В и размера ореола l . Так происходит потому, что для контактов Au(contact)/ n -GaAs заряд ОПЗ положителен и вектор нескомпенсированного электрического поля \mathbf{E}^* направлен от контакта противоположно вектору электрического поля \mathbf{E}_{grad} . В результате увеличение диаметра контакта D и соответственно увеличение положительного заряда ОПЗ приводят к увеличению E^* и уменьшению $E_l = E_{\text{grad}} - E^*$. В пределе, при $D \rightarrow \infty$, $E^* \rightarrow E_{\text{grad}}$ и встроенное поле $E_l \rightarrow 0$. На практике для $N_D = 5 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$ диаметр контакта, когда E_l перестает оказывать заметное влияние, превышает 700 мкм. Для контактов Au/ p^+ -GaAs с БШ уменьшение диаметра контакта D , напротив, приводит к уменьшению влияния периферии, что проявляется в уменьшении φ^* от 0.378 до 0.116 В и уменьшении размера ореола l , и к увеличению электростатического потенциала контакта $\varphi_{\text{Au}}(\text{contact})$ от 4.962 до 5.224 В. Для контактов Au(contact)/ p^+ -GaAs заряд ОПЗ отрицателен и вектор \mathbf{E}^* сонаправлен с вектором \mathbf{E}_{grad} . В этом случае увеличение E^* при увеличении отрицательного заряда ОПЗ, связанное с увеличением диаметра контакта D , приводит не к уменьшению, а к увеличению модуля вектора: $E_l = E_{\text{grad}} + E^*$.

Отсутствие ОПЗ в МДП контактах приводит к тому, что размер ореола l и величина падения потенциала φ^* в таких контактах не зависят от их размеров, а определяются в основном градиентом между потенциалом сво-

бодной полупроводниковой поверхности и потенциалом контакта.

Список литературы

- [1] Н.А. Торхов. Изв. вузов. Физика. Деп. в ВИНИТИ № 334–B2008 от 18.04.2008.
- [2] Н.А. Торхов. ФТП, **44**(5), 615 (2010).
- [3] www.ntmdt-tips.com
- [4] В.Л. Миронов. *Основы сканирующей зондовой микроскопии* (Нижний Новгород, Институт физики микроструктур РАН, 2004).
- [5] Н.А. Торхов, В.Г. Божков, И.В. Ивонин, В.А. Новиков. Поверхность, № 11, 1 (2009).
- [6] Н.А. Торхов, В.Г. Божков, И.В. Ивонин, В.А. Новиков. ФТП **43**(1), 38 (2009).
- [7] Н.А. Торхов, В.А. Новиков. ФТП, **43**(8), 1109 (2009).
- [8] А.В. Анкудинов, В.П. Евтихеев, К.С. Ладутенко, А.Н. Титков, R. Laiho, ФТП, **40**(8), 1009 (2006).
- [9] Н.А. Торхов. Поверхность, № 1, 1 (2010).
- [10] В.Л. Бонч-Бруевич, С.Г. Калашников. *Физика полупроводников*, 2-е изд. (М., Наука, 1990).

Редактор Л.В. Шаронова

The influence of periphery of Shottky barrier metal–semiconductor contacts on their electrophysical characteristics

N.A. Torkhov, V.A. Novikov⁺

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

⁺ Tomsk State University,
634050 Tomsk, Russia

Abstract At formation of a Shottky-barrier contact as an Au film deposited on a surface of p - or n -type conductivity gallium arsenide, the electric field \mathbf{E}_l appears which extends around the contact on distance l (halo) ten times exceeding the size of a space-charge region. This reduces the electrostatic potential of the contact φ_{Au} by significant value φ^* . Generally size l and electrostatic potential reduction value φ^* are determined by sign and value of charge in the space-charge region which depend on contact diameter D , concentration and conductivity type of semiconductor. For Shottky-barrier Au/ n -GaAs contacts reduction of D leads to periphery growing in importance that appears in φ^* increase and φ_{Au} and l size decrease. For Au/ p -GaAs contacts D decrease leads to minimizing the periphery effect, and decrease of φ^* , increase of φ_{Au} and l size are observed. Absence of space-charge region in metal–insulator–semiconductor contacts results in l and φ^* not depending on their diameters.