

## СКАНИРУЮЩАЯ ЗОНДОВАЯ МИКРОСКОПИЯ СКОЛОВ НЕЛЕГИРОВАННЫХ ГЕТЕРОСТРУКТУР GaInP/AlGaInP И CdS/ZnSSe

Д. Е. Свиридов, В. И. Козловский, Н. В. Забавин

*Методами сканирующей зондовой микроскопии были исследованы сколы нелегированных наноразмерных гетероструктур с квантовыми ямами GaInP/AlGaInP и CdS/ZnSSe. Контактным методом был обнаружен нанорельеф, формируемый на поверхности скола из-за упругих напряжений в квантовых ямах. Токовый метод дал более контрастные изображения. Показано, что в нелегированных гетероструктурах значение тока зависит от величины барьера Шоттки на контакте зонда со слоями структуры, собственной концентрации носителей в них, а также от уровня легирования ростовой подложки, интенсивности и спектра внешней подсветки.*

**Ключевые слова:** квантовые ямы, гетероструктуры, атомно-силовая микроскопия.

1. Зондовая микроскопия, в частности атомно-силовая микроскопия, поверхности сколов является эффективным средством исследования наноразмерных гетероструктур. Используя полуконтактный метод сканирования, в ряде гетероструктур с квантовыми ямами (КЯ) удастся измерить нанорельеф, обусловленный поверхностной релаксацией внутренних упругих напряжений, возникающих из-за рассогласования параметров кристаллической решетки отдельных слоев [1]. Для получения численных оценок необходима чистая неокисленная поверхность, что достигается при изучении сколов в вакууме [2].

Другим эффективным методом исследования гетероструктур является метод сканирующей микроскопии сопротивления растекания [3]. Данный метод позволяет визуализировать отдельные нанообъекты, имеющие различную проводимость [4]. Этим ме-

тодом исследован ряд легированных гетероструктур на основе кремния и соединений АЗВ5 [5–7]. Для количественных измерений необходима калибровка метода по образцам с известной проводимостью. Было обнаружено также, что на измерения проводимости влияет подсветка излучением лазера, встроенного в атомно-силовой микроскоп (АСМ) [8].

В данной работе исследуется возможность использования вышеописанных методов на воздухе для исследования нелегированных многослойных гетероструктур с КЯ GaInP/AlGaInP и CdS/ZnSSe. Эти гетероструктуры перспективны для использования в лазерах с продольной оптической накачкой и накачкой электронным пучком [9, 10].

*2. Эксперимент.* В работе представлены результаты, полученные при исследовании трех нелегированных гетероструктур, выращенных парофазной эпитаксией из металлоорганических соединений на подложках GaAs, разориентированных от плоскости (001) к плоскости (111)А на  $10^\circ$ . Первая гетероструктура, излучающая в красной области спектра (660 нм), содержала последовательно расположенные на подложке GaAs  $n^+$ -типа: первое высокоотражающее брэгговское зеркало из 40 пар чередующихся четвертьволновых слоев AlAs/Al<sub>0.45</sub>Ga<sub>0.55</sub>As, активную часть из 13 квантовых ям (КЯ) Ga<sub>0.46</sub>In<sub>0.54</sub>P толщиной 6 нм, разделенных барьерными слоями (Al<sub>0.6</sub>Ga<sub>0.4</sub>)<sub>0.5</sub>In<sub>0.5</sub>P толщиной 401 нм, и второе брэгговское зеркало из 17 пар слоев AlAs/Al<sub>0.45</sub>Ga<sub>0.55</sub>As. Вторая гетероструктура отличалась от первой отсутствием брэгговских зеркал, и активная часть содержала 25 КЯ Ga<sub>0.51</sub>In<sub>0.49</sub>P толщиной 7 нм, разделенных барьерами (Al<sub>0.7</sub>Ga<sub>0.3</sub>)<sub>0.51</sub>In<sub>0.49</sub>P толщиной 186 нм и излучающих с  $\lambda = 635$  нм. Третья гетероструктура CdS/ZnS<sub>0.07</sub>Se<sub>0.93</sub>, излучающая в зеленой области спектра (560 нм), была выращена на полуизолирующем GaAs. Она содержала 10 слоев CdS толщиной 5 нм, разделенных барьерными слоями ZnSSe толщиной 140 нм.

Сколы по плоскостям (110) производились непосредственно перед измерениями. Использовался АСМ типа Solver P-47 Pro (НТ МДТ г. Зеленоград). Образцы крепились в специально сконструированном держателе. Схема токовых измерений представлена на рис. 1. Зонд находился под нулевым потенциалом. Второй контакт был сформирован посредством нанесения жидкой InGa эвтектики на свежий скол гетероструктуры. Постоянное смещение прикладывалось к этому контакту и могло изменяться в диапазоне от  $-10$  В до  $+10$  В. Измерения проводились при комнатной температуре на воздухе. Диапазон измерения тока составлял 5 пА – 10 нА в линейном и 10 нА – 100 мкА в логарифмическом режимах. Измерялись также вольт-амперные характеристики (ВАХ) исследуемых гетероструктур. Типичное время измерения одной ВАХ составляло

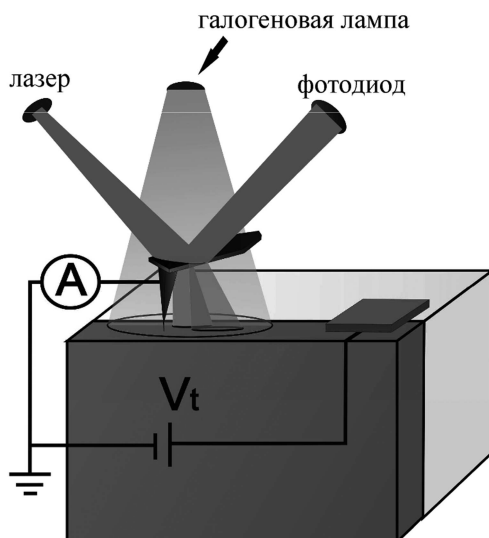


Рис. 1: Схема измерения тока в контактном режиме сканирования (пояснения в тексте).

2 с. Измерения делались определенными сериями с фиксированным смещением зонда вдоль направления, перпендикулярного слоям гетероструктуры. В одной серии можно было снять ВАХ при контакте как с КЯ, так и с барьером.

Использовались коммерческие кремниевые зонды с алмазным проводящим покрытием, легированным бором (Nanosensors GmbH). Удельное сопротивление алмазной пленки было равно 0.01–0.02 Ом·см, постоянная жесткости кантилевера – 24 Н/м [11]. Большинство измерений было выполнено при силе прижатия зонда к поверхности на уровне 0.5 мкН и частоте сканирования 0.6 Гц. Радиус закругления зонда был равен 50 нм. Было замечено, что в процессе использования зондов происходит ухудшение их проводящих свойств. Поэтому каждый зонд тестировался посредством получения ВАХ на пиролитическом графите ( $\rho_1 = 4 \cdot 10^{-5}$  Ом·см) до и после проведения измерений. ВАХ таких контактов были линейны в диапазоне токов от 10 пА до 100 мкА. Для новых зондов сопротивление контакта составляло  $R = 10^4$  Ом. Учитывая, что сопротивление пирографита оценивается величиной  $\rho_1/4r \approx 10$  Ом, замеренное сопротивление соответствует сопротивлению зонда,  $r$  – радиус контакта зонда с образцом.

Встроенный в АСМ лазер (ВЛ), использующийся в системе контроля отклонения кантилевера, имел мощность излучения 1 мВт на длине волны 653 нм. Его излучение фокусировалось в пятно 50 мкм на верхней поверхности кантилевера, покрытого

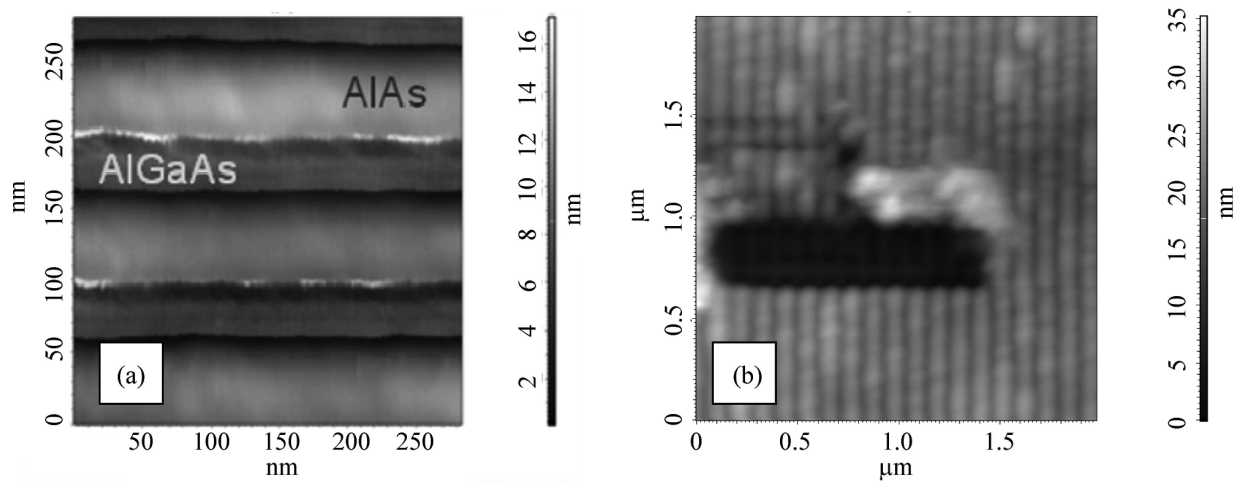


Рис. 2: Изображение брэгговского зеркала  $AlAs/AlGaAs$  в режиме полуконтактного сканирования: исходного (a) и после удаления оксидного слоя на части поверхности при контактном сканировании (b).

тонким слоем Al (рис. 1). Ширина кантилевера составляла 40 мкм. Часть излучения лазера попадала на исследуемую поверхность скола. Чтобы избежать влияния этого излучения на измеряемый ток, в ряде экспериментов лазер выключался на время измерения тока. В этом случае для предотвращения автоматического втягивания пьезосканера коэффициент усиления обратной связи (КУОС) устанавливался равным нулю. Для дополнительного внешнего освещения поверхности скола вблизи точечного контакта использовалось излучение галогеновой лампы (ГЛ), используемой в данном АСМ для оптического контроля области зондирования.

*3. Результаты и их обсуждение.* Двумерное изображение участка брэгговского зеркала  $AlAs/AlGaAs$ , полученное в режиме полуконтактного сканирования, представлено на рис. 2(a). Толщины слоев  $AlAs$  и  $AlGaAs$  составляют 60 нм и 40 нм, что несколько отличается от значений 56 нм и 47 нм, рассчитанных из скоростей роста для более толстых слоев. Высокий контраст изображения обусловлен большей степенью окисления слоев  $AlAs$ , чем слоев  $AlGaAs$ . На трехмерном изображении (не представлено) видно, что возвышающийся окисный слой над  $AlAs$  имеет вертикальные стенки на гетерограницах. Поэтому отличие измеренных толщин от расчетных значений нельзя приписать боковому окислению слоев  $AlAs$ , оно является следствием особенности выращивания тонких слоев.

Окисный слой представляет собой рыхлое образование. На рис. 2(b) представлено

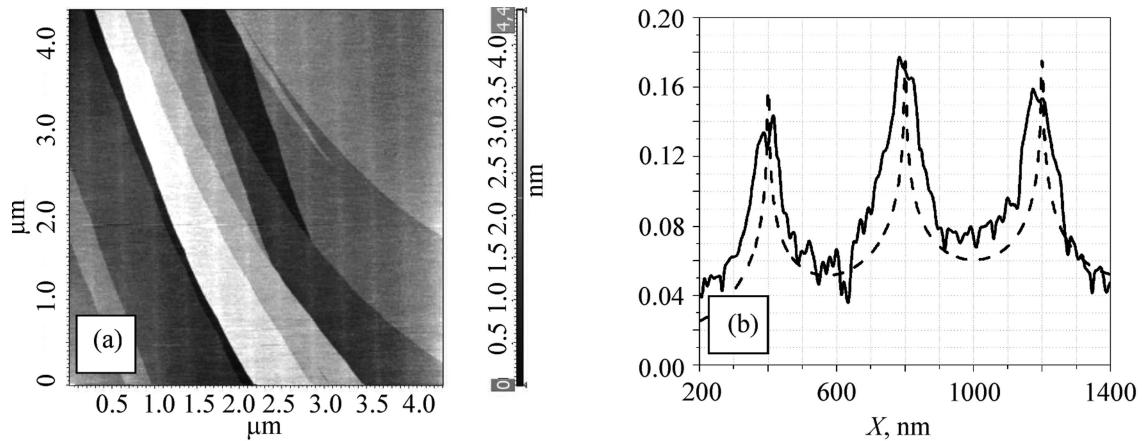


Рис. 3: Изображение участка скола гетероструктуры с 13 КЯ GaInP/AlGaInP, полученное в контактном режиме сканирования, (a) и усредненный вдоль слоев профиль поверхности (сплошная кривая) в сравнении с расчетной по формуле (1) кривой (b).

изображение участка зеркала с размерами  $2 \times 2$  мкм, полученное методом полуконтактного сканирования, внутри которого предварительно было проведено сканирование в контактном режиме по области  $250 \times 1250$  нм. В области первого сканирования образовалось углубление в 10–13 нм. При контактном сканировании материал окисла был снят зондом с поверхности скола. Поскольку второй скан был сделан в течение минуты после первого скана, то окисел еще не успел сформироваться на площади первого скана.

На рис. 3(a) представлено изображение активной части гетероструктуры GaInP/AlGaInP. Материал этой части в меньшей мере подвержен окислению на воздухе. Светлые и темные полосы, пронизывающие изображение по диагонали, соответствуют ступеням скола. На их фоне видны периодически расположенные слабые возвышенности от КЯ GaInP. Они связаны с поверхностной релаксацией внутренних напряжений. На рис. 3(b) представлен усредненный вдоль слоев профиль поверхности участка, расположенного в верхнем правом углу изображения на рис. 3(a). Максимальный перепад высот достигает значения 0.12 нм. На этом же рисунке представлена кривая, рассчитанная по формуле, выведенной на основе теории упругости в предположении слабого различия в константах упругости материалов барьера и КЯ [2]:

$$u(z) = C + \frac{2}{\pi}(1 + \nu) \cdot \epsilon \cdot \sum_{k=0}^{12} \left\{ (z - k \cdot L - a) \cdot \ln \left( \frac{|z - k \cdot L - a|}{a} \right) + (z - k \cdot L + a) \cdot \ln \left( \frac{|z - k \cdot L + a|}{a} \right) \right\}, \quad (1)$$

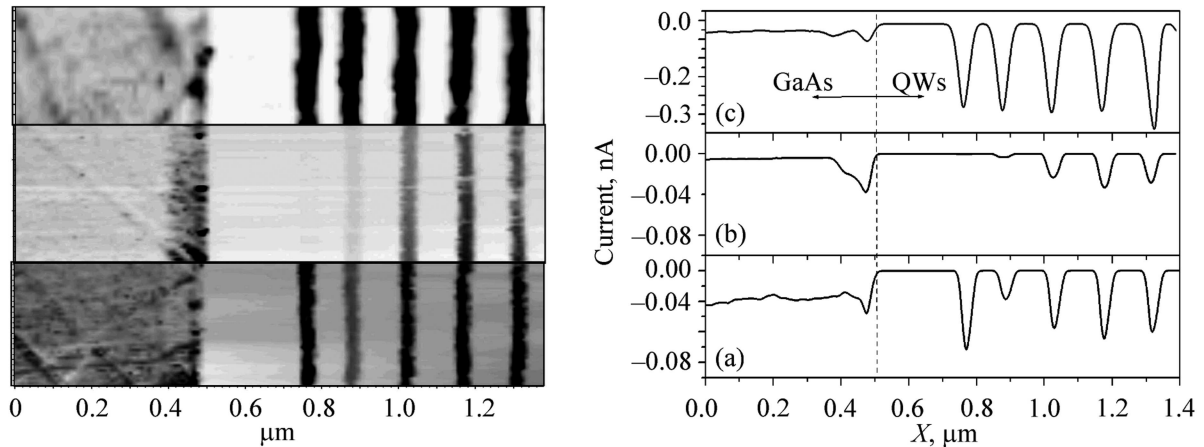


Рис. 4: Изображения скола гетероструктуры  $\text{CdS}/\text{ZnSSe}$  в токовом режиме сканирования с  $U = -2$  В (слева) и соответствующие зависимости тока от расстояния вдоль нормали к гетероструктуре (справа) при различных режимах сканирования: при включенных встроенном лазере и обратной связи (а), при выключенных лазере и связи (б) и выключенной связи, но включенной галогеновой лампе (с).

где  $C$  – подгоночная константа,  $L$  – толщина барьерного слоя,  $a$  – ширина КЯ,  $k$  – номер КЯ,  $\nu \approx 0.34$  – коэффициент Пуассона,  $\epsilon$  – рассогласование периода кристаллической решетки между барьером и КЯ. Лучшее согласование расчетной кривой с экспериментальной наблюдается при  $\epsilon = 0.0048$ , что близко к расчетному значению. Однако на эксперименте не удается прописать узкие пики вблизи КЯ. Это связано со слишком малой высотой неровностей, сравнимой с атомными размерами. Более высокие перепады, до 0.35 нм, наблюдаются на сколах гетероструктуры  $\text{CdS}/\text{ZnSSe}$ , что связано с большим ( $\epsilon \approx 0.03$ ) рассогласованием периодов кристаллической решетки барьера и КЯ.

Контрастность изображения КЯ может быть существенно повышена при использовании метода сканирующей микроскопии сопротивления растекания. На рис. 4 слева представлены изображения скола гетероструктуры  $\text{CdS}/\text{ZnSSe}$ , полученные в трех различных режимах сканирования: при включенном встроенном лазере и  $\text{КУОС} \neq 0$  (а), при выключенном лазере и  $\text{КУОС} = 0$  (б), при включенной ГЛ и  $\text{КУОС} = 0$  (с). Соответствующие усредненные зависимости тока от расстояния в направлении нормали к поверхности гетероструктуры изображены на рис. 4 (справа).

Из рис. 4 видно, что подсветка оказывает сильное влияние на изображение. Кроме того, ток, протекающий через зонд, зависит от его положения относительно гетеропе-

перехода GaAs/ZnSSe. В темноте ток относительно мал при контакте зонда с подложкой, кроме узкой области вблизи гетероперехода, и возрастает при переходе от первой КЯ к последующим. Подсветка приводит к увеличению тока при контакте зонда с подложкой, но особенность на токовой зависимости вблизи гетероперехода остается. С другой стороны, ток при контакте с первой КЯ становится преобладающим. Дополнительные эксперименты с использованием светофильтров показывают, что нет принципиального различия во влиянии спектра подсветки, если энергия кванта излучения больше ширины запрещенной зоны GaAs.

Вышеперечисленные закономерности можно объяснить, предполагая, что в случае нелегированных гетероструктур на визуализацию слоев в основном влияет высота барьера Шоттки, формируемого вблизи контакта зонда со сколотой поверхностью и зависящей от химического состава слоев гетероструктуры. Это является существенным отличием от случая легированных гетероструктур, где контраст формируется в основном из-за различия в проводимости слоев.

Гетеропереход GaAs/ZnSSe близок к гетеропереходу GaAs/ZnSe и имеет разрывы зон I-го типа с разрывом зоны проводимости примерно 0.3 эВ [12]. Увеличение тока в темноте при переходе контакта зонда от ближайшей к подложке КЯ к последующим (рис. 4(b)), связано с возникновением области пространственного заряда в ZnSSe при образовании гетероперехода GaAs/ZnSSe за счет перетекания части электронов в GaAs. Таким образом, в структуре присутствует изгиб зон, который приводит к различному положению дна зоны проводимости у различных КЯ относительно уровня Ферми и различной концентрации носителей в них. Подсветка излучением ВЛ, в этом случае, приводит к генерации неравновесных электронов и дырок в GaAs. Часть неравновесных электронов преодолевает потенциальный барьер на границе GaAs/ZnSSe (0.3 эВ) и переходит в ZnSSe, приводя, таким образом, к исчезновению области пространственного заряда и увеличению значений концентрации в слоях CdS.

На рис. 5 представлены вольт-амперные характеристики при контакте зонда с КЯ и барьером для двух гетероструктур GaInP/AlGaInP при выключенном встроенном лазере. Подсветка лазером влияет только на изображения структуры с брэгговскими зеркалами. Видно, что ВАХ имеют напряжение отсечки тока. Это напряжение существенно выше при контакте с барьерными слоями. Наибольший контраст изображения наблюдается, если сканирование осуществляется при напряжении, значение которого находится между напряжениями отсечки барьерных слоев и КЯ. ВАХ гетероструктуры с брэгговскими зеркалами имеют область насыщения (рис. 5(a)). При подсветке

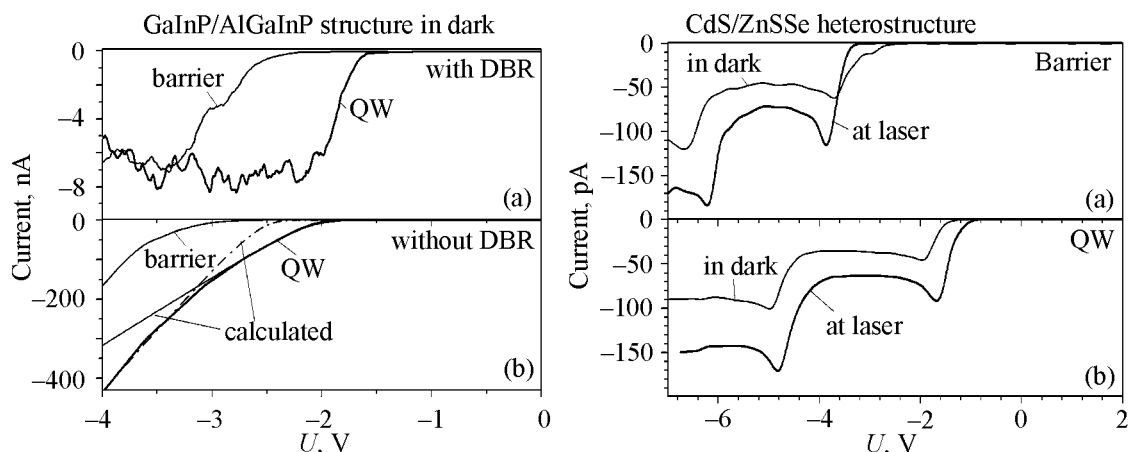


Рис. 5: ВАХ в темноте при контакте зонда с КЯ и барьером для двух гетероструктур GaInP/AlGaInP с (a) и без (b) брэгговского зеркала. Сплошная “calculated” и штрихпунктир – расчет по формуле (2) соответственно при  $R = 5.5 \cdot 10^6$  Ом и  $3 \cdot 10^6$  Ом.

Рис. 6: ВАХ при контакте зонда с барьером (a) и КЯ (b) для гетероструктуры CdS/ZnSSe в темноте и при включенном встроенном лазере.

галогеновой лампой насыщение тока исчезает, и ВАХ становятся похожими на ВАХ гетероструктуры без брэгговских зеркал (рис. 5(b)). Так как ВАХ, полученные на слоях брэгговских зеркал (не представлены), свидетельствуют о том, что они обладают  $p$  типом проводимости, то мы считаем, что насыщение тока связано с выпрямляющими свойствами обратного смещенного  $p$ - $n$  гетероперехода (AlAs/AlGaAs – AlGaInP), которые исчезают при подсветке коротковолновым излучением галогеновой лампы.

В случае отсутствия потенциальных барьеров на пути растекания тока, кроме барьера Шоттки на контакте зонда к поверхности скола, зависимость тока от приложенного напряжения можно выразить в виде [13]:

$$I = S \cdot A^* \cdot T^2 \cdot \exp\left(-\frac{\phi_B}{k \cdot T} + \frac{e(U - I \cdot R)}{\eta \cdot k \cdot T}\right), \quad (2)$$

где  $U$  – потенциал, прикладываемый ко второму контакту,  $S$  – площадь электрического контакта,  $A^*$  – эффективная постоянная Ричардсона,  $T$  – абсолютная температура,  $\phi_B$  – высота барьера Шоттки для прохождения электронов из зонда в полупроводник,  $e, k, \eta$  – заряд электрона, постоянная Больцмана и параметр неидеальности. Сопротивление  $R$  включает в себя последовательность сопротивлений: сопротивление зонда, сопротивление растеканию тока от зонда в объем гетероструктуры, сопротивление перехода подложка – гетероструктура, сопротивление подложки и сопротивление второго



контакта. На рис. 5(b) представлены две расчетные кривые для двух наборов параметров  $I_S = S \cdot A^* \cdot T^2 \cdot \exp(-\phi_B/kT) = 10^{-21}$  А,  $\eta = 2.7$ ,  $R = 5.5 \cdot 10^6$  Ом (сплошная) и  $I_S = 2 \cdot 10^{-24}$  А,  $\eta = 2.7$ ,  $R = 3 \cdot 10^6$  Ом (штрих-пунктир). Эти кривые хорошо описывают верхнюю и нижнюю часть экспериментальной кривой. Предполагая, что основной вклад в сопротивление вносит сопротивление растекания тока вдоль КЯ, получаем оценку этого сопротивления –  $4 \cdot 10^6$  Ом.

При объемном растекании тока обычно считается, что  $R_s \approx \chi \cdot \rho / 2d$ , где  $\rho$  – удельное сопротивление,  $d$  – диаметр области контакта зонда с поверхностью скола, а коэффициент  $\chi$  – геометрический фактор растекания. В нашем случае КЯ имеет более высокую проводимость, чем барьерные слои, и ее ширина сравнима с параметром  $d$ . Поэтому при контакте зонда с КЯ силовые линии тока сначала расходятся от контакта по слою КЯ, а затем через барьерный слой в направлении к подложке. При контакте с барьером ток идет сначала к ближайшей КЯ, силовые линии расходятся по ней, а затем ток направляется в сторону подложки. Оценки показывают, что в случае гетероструктуры с КЯ коэффициент  $\chi \approx 10$ . Учитывая далее, что удельное сопротивление в рассматриваемом случае определяется в основном концентрацией  $n$  и подвижностью  $\mu$  электронов,  $\rho = (e \cdot \mu \cdot n)^{-1}$ , и предполагая, что  $a = d = 6$  нм и  $\mu = 2000$  см<sup>2</sup>·В<sup>-1</sup>·с<sup>-1</sup> для КЯ GaInP [14], получаем оценку концентрации электронов в КЯ:  $n \approx 6 \cdot 10^{15}$  см<sup>-3</sup>.

На рис. 6 представлены ВАХ для гетероструктуры CdS/ZnSSe при контакте зонда к КЯ и барьеру. Измерения проводились как в темноте, так и при включенном лазере. Ток в этом случае значительно меньше, чем в случае гетероструктуры GaInP/AlGaInP. Другой особенностью является наличие участков с отрицательным дифференциальным сопротивлением. При подсветке лазером ток увеличивается, но форма кривой не изменяется.

Основной причиной малых токов является низкая проводимость барьерных слоев и слоев КЯ. Мы предполагаем также, что, кроме барьера Шоттки, в гетероструктуре формируется два дополнительных барьера на границе GaAs – ZnSSe и втором контакте. Эти барьеры возникают только при использовании нелегированной подложки GaAs. При измерении ВАХ мы фактически измеряем емкостной ток. Существенным при этом является скорость изменения напряжения во время измерения ВАХ. Однако ее нельзя было существенно изменять из-за имеющего место дрейфа зонда по поверхности. При увеличении прикладываемого напряжения сначала открывается диод Шоттки. Равновесные электроны, имеющиеся в КЯ, начинают быстро стекать в зонд. Их концентрация

в КЯ не успевает пополняться, поскольку два других барьера закрыты. Поэтому ток начинает падать (первый участок с отрицательным дифференциальным сопротивлением) и выходит на насыщение. По мере дальнейшего увеличения напряжения открывается второй барьер, и ток снова начинает расти из-за стекания заряда, накопленного в GaAs вблизи гетеровалентной границы (второй участок отрицательного дифференциального сопротивления). Наконец, при  $U < -4.8$  В для КЯ ( $-6$  В для барьера) открывается третий барьер и ток начинает определяться суммарным активным сопротивлением всей структуры и зонда. Исходную концентрацию электронов в КЯ можно оценить по полному заряду, который прошел через зонд в области первого всплеска тока на ВАХ. В темноте этот всплеск характеризуется протеканием тока  $5 \cdot 10^{-11}$  А в течение времени 0.1 с. Предполагая далее, что этот заряд был накоплен в 10 КЯ толщиной 5 нм и площадью  $0.1 \text{ см}^2$  (площадь образца), получаем оценку  $n \sim 10^{14} \text{ см}^{-3}$ . При включении встроенного лазера концентрация носителей возрастает примерно вдвое.

4. *Заключение.* В работе исследованы сколы нелегированных наноразмерных гетероструктур GaInP/AlGaInP, CdS/ZnSSe и брэгговских зеркал AlAs/AlGaAs методами сканирующей зондовой микроскопии. Показано, что на слабо окисляемых поверхностях можно обычным полуконтактным методом на воздухе измерять неровности, вызванные наличием внутренних напряжений в КЯ. В исследованных гетероструктурах масштаб этих неровностей по высоте составил 0.1–0.4 нм. В то же время толщина окисного слоя на сколах брэгговских зеркал AlAs/AlGaAs может превышать 10 нм. Токовый контактный метод дал более контрастные изображения сколов. Контраст формируется в основном из-за различия в величинах барьера Шоттки, формируемого при контакте зонда с КЯ и барьером. В случае сильнолегированной подложки и отсутствия брэгговского зеркала между подложкой и КЯ данным методом удастся измерить сопротивление растеканию тока в гетероструктуре и оценить концентрацию электронов в КЯ, которая составила величину  $6 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3}$ . Наличие брэгговского зеркала приводит к насыщению тока с увеличением прикладываемого напряжения на втором контакте. Вольт-амперные характеристики, полученные на сколах гетероструктуры CdS/ZnSSe, выращенной на нелегированной подложке, имеют участки с отрицательным дифференциальным сопротивлением. Наличие таких участков связано с формированием дополнительных потенциальных барьеров для протекания тока на границе подложка–гетероструктура и на втором неомическом контакте.

Данная работа выполнена при поддержке РФФИ (грант N 10-02-00741), а также программ фундаментальных исследований ОФН РАН “Физика новых материалов и

структур” и “Физические и технологические исследования полупроводниковых лазеров, направленные на достижение предельных параметров”.

## Л И Т Е Р А Т У Р А

- [1] F. Lelarge, O. Dehaese, E. Kapon, and C. Priester, *Appl. Phys. A* **69**, 347 (1999).
- [2] J. H. Davies, D. M. Bruls, J.W.A.M. Vugs, and P. M. Koenraad, *J. Appl. Phys.* **91**(7), 4171 (2002).
- [3] P. Eyben, M. Xu, N. Duhayon, and W. Vandervorst, *J. Vac. Sci. Technol. B* **20**(1), 471 (2002).
- [4] J. Liu, K. C. Mandal and G. Koley, *Semicond. Sci. Technol.* **24**, 045012 (2009).
- [5] K. Maknys, O. Douheret and S. Anand, *Appl. Phys. Lett.* **83**(11), 2184 (2003).
- [6] F. Giannazzo, V. Raineri, S. Mirabella, G. Impellizzeri and F. Priolo, *Appl. Phys. Lett.* **88**, 043117 (2006).
- [7] D. Ban, E. H. Sargent and J. K. White, *J. Vac. Sci. Technol. B* **20**(5), 2126 (2002).
- [8] G. H. Buh, J. J. Kopanski, J. F. Marchiando, A. G. Birdwell and Y. Kuk, *J. Appl. Phys.* **94**(4) 2680 (2003).
- [9] V. I. Kozlovsky, B. M. Lavrushin, Ya.K. Skasyrsky and M. D. Tiberi, *Quantum electronics* **39**(8), 731 (2009).
- [10] V. Yu. Bondarev, V. I. Kozlovsky and Ya. K. Skasyrsky, *Quantum electronics* **37**(9), 853 (2007).
- [11] [www.nanosensors.com](http://www.nanosensors.com).
- [12] M. S. Yeganeh, J. Qi, A. G. Yodh, and M. C. Tamargo, *Phys. Rev. Lett.* **68**(25), 3761 (1992).
- [13] D. E. Sviridov, V. I. Kozlovsky, and D. A. Sannikov, *Phys. Stat. Sol. b* **247**(6), 1420 (2010).
- [14] S. F. Yoon, K. W. Mah and H. Q. Zheng, *J. Appl. Phys.* **85**(10), 7374 (1999).

Поступила в редакцию 21 января 2011 г.