

05;06;11;12

## Влияние модификации поверхности полупроводника на свойства водородочувствительных диодов Шоттки на арсениде галлия

© С.В. Тихов, Е.Л. Шоболов, С.Б. Левичев, Н.В. Байдусь

Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского,  
603950 Нижний Новгород, Россия  
e-mail: fdp@phys.unn.ru

(Поступило в Редакцию 22 июля 2002 г.)

Установлено, что модификация поверхности полупроводника в водородочувствительных диодах Шоттки на GaAs путем неполирующего травления или введения в область пространственного заряда полупроводника квантовых ям и квантовых точек может увеличивать чувствительность к водороду в 8–37 раз после травления и на два–три порядка после введения квантовых ям и квантовых точек. Показано, что это увеличение связано с уменьшением высоты барьера Pd/GaAs, с задерживанием диффузии водорода в объем GaAs напряженными квантовыми слоями и с ростом рекомбинационной составляющей тока. Наличие рекомбинационной составляющей подтверждается электролюминесценцией от квантовых ям и квантовых точек и от GaAs. Для эффекта очувствления после травления определяющим является химический состав травителя.

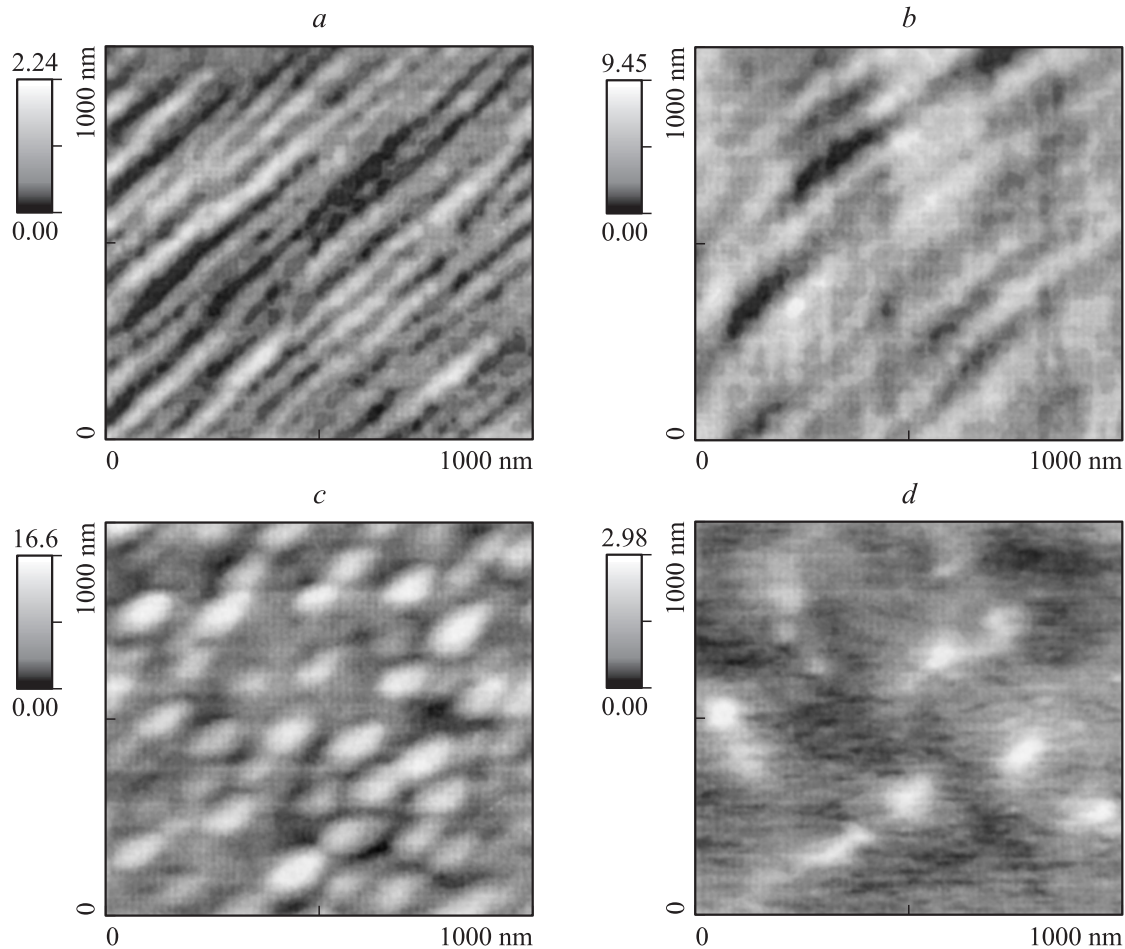
### Введение

Микроэлектронные сенсоры водорода могут быть созданы на основе структур металл–диэлектрик–полупроводник (МДП), транзисторов со структурой МДП и диодов Шоттки (ДШ) с каталитически активным электродом из Pd [1]. Наиболее чувствительными к водороду оказываются МДП диоды или транзисторы на Si: максимальный сдвиг водородочувствительной характеристики в них достигает 0.6 V, а обнаружительный порог  $\sim 10^{-5}$  объемных % [2,3]. Однако эти сенсоры требуют сложной технологии изготовления (для получения малой плотности электронных состояний на границе SiO<sub>2</sub>/Si), а также относительно сложной регистрации отклика (по емкости или по сдвигу напряжения плоских зон на поверхности полупроводника). Диоды Шоттки с тонкой прослойкой окисла не настолько сложны в изготовлении и имеют широкие возможности регистрации сигнала (по емкости, току, фотоэдс). Однако эти диоды характеризуются значительно меньшей чувствительностью к водороду: максимальный сдвиг напряжения прямой ветви вольт-амперной характеристики  $\approx 0.2$  V, обнаружительный порог при регистрации по току  $\approx 10^{-2}\%$ , а при регистрации по фотоэдс  $\approx 10^{-4}\%$  [4–7].

В настоящей работе ставилась задача нахождения способов повышения чувствительности к водороду диодов Шоттки со структурой Pd/термический окисел/GaAs. Ожидалось увеличение адсорбционной активности водородочувствительной поверхности вследствие получения развитого микрорельефа после неполирующего травления [8] и задерживания диффузии водорода в объем GaAs напряженными квантово-размерными слоями квантовых точек (КТ) InAs/GaAs и квантовых ям (КЯ) InGaAs/GaAs, вводимых в область пространственного заряда (ОПЗ) GaAs [9].

### Методика эксперимента

Диоды Шоттки создавались на основе эпитаксиальных слоев *n*-GaAs толщиной  $\approx 1$  μm с концентрацией электронов  $n_0 \approx 10^{16}$  cm<sup>-3</sup>, выращенных методом газофазной эпитаксии при атмосферном давлении с использованием металл-органических соединений (метод МОСГЭ) при атмосферном давлении на подложках *n*-GaAs, разориентированных на +3° относительно плоскости (100) ( $n_0 \approx 10^{16}$  cm<sup>-3</sup>). Перед напылением металла в некоторых диодах поверхность GaAs модифицировалась травлением в неполирующем ферроцианидном травителе состава (0.8MK<sub>3</sub>[Fe(CN)<sub>6</sub>] в 0.3M растворе KOH):H<sub>2</sub>O:глицерин (1:5:8) и в травителе Сиртла CrO<sub>3</sub>(30%):HF (1:1). Скорость травления в ферроцианидном травителе для GaAs составляла 2–4 nm/min, а время травления варьировалось в интервале от 10 до 30 min. Скорость травления GaAs в травителе Сиртла была  $\approx 4$  μm/min, а время травления выбиралось  $\approx 3, 11$  и 30 s. На некоторых образцах в область пространственного заряда полупроводника на расстоянии 15 nm от поверхности через промежуточный спейс-слой (СС) толщиной 10 nm вводились КЯ из In<sub>x</sub>Ga<sub>1-x</sub>As ( $x = 0.2$ ) толщиной 5 nm и КТ из InAs (5 монослоев). В разных диодах порядок следования квантовых слоев менялся от КЯ/СС/КТ до КТ/СС/КЯ, отсчитывая от поверхности ЭП. Методика создания КЯ и КТ описана в [10,11]. Перед нанесением Pd образцы нагревались на воздухе до 300°C в течение 30 min для создания термического окисла толщиной  $\approx 3 - 4$  nm. Полупрозрачные для света электроды из Pd толщиной  $\approx 20$  nm наносились на окисленную поверхность полупроводника методом термического испарения в вакууме. Использовался стандартный для ДШ на GaAs режим напыления, позволяющий получать наилучшие вольт-амперные характеристики (ВАХ): предваритель-



**Рис. 1.** АСМ изображение окисленной поверхности полупроводника и металла. *a* — поверхность GaAs до травления; *b* — поверхность Pd, нанесенного на нетравленный GaAs; *c* — поверхность полупроводника после травления в ферроцианидном травителе; *d* — поверхность полупроводника после травления в травителе Сиртла.

ный прогрев до  $200^{\circ}\text{C}$  и осаждение Pd на подогретую до  $100^{\circ}\text{C}$  подложку [12]. Площадь Pd электрода составляла  $\approx 2.35 \cdot 10^{-2} \text{ cm}^{-2}$ .

Исследовались ВАХ в темноте и при освещении неразложенным светом при комнатной и оптимальной для газовых сенсоров температуре  $100^{\circ}\text{C}$  [5]. Измерения проводились в потоке воздуха и в потоке воздушно-аргоновой смеси с водородом концентрации 0.6 объемных % по методике, описанной в работе [5]. Измерялись зависимости фоточувствительности малосигнальной фотоэДС  $S$  от энергии фотонов  $h\nu$  при комнатной температуре и спектральные кривые электролюминесценции  $I_{EL}(h\nu)$  при импульсном прямом смещении на диоде амплитудой  $\approx 1 \text{ V}$  и токе  $\approx 30 \text{ mA}$  и фотолюминесценции  $I_{PL}(h\nu)$  при  $77 \text{ K}$ .

Микрорельеф поверхности Pd и полупроводника исследовался на атомно-силовом микроскопе АСМ Topometrix® Accurex™ ТМХ=2000 в неконтактном режиме. Для количественной оценки топологии поверхности рассчитывалась ее средняя шероховатость  $h$  и фрактальная размерность  $\Phi$ . Согласно [13], фрактальная раз-

мерность более полно характеризует структуру поверхности и позволяет отличать разные типы поверхностей, используя всего одно число, заключенное в интервале от 2.00 (совершенно гладкая поверхность) до 3.00 (сильно изрезанная, пористая поверхность). Фрактальная размерность определялась методом подсчета клеток [14].

## Экспериментальные результаты и обсуждение

1. Морфология поверхности. На рис. 1 показано АСМ изображение окисленной (*a*) и покрытой Pd (*b*) поверхности GaAs. На рисунках четко видны ступени роста в виде гребенчатой структуры. Средняя шероховатость окисленной поверхности эпитаксиальной пленки составила  $\approx 0.5 \text{ nm}$ , а фрактальная размерность  $\approx 2.54$ . Поверхность Pd практически повторяла микрорельеф окисленной поверхности ( $h \approx 0.6 \text{ nm}$ ,  $\Phi \approx 2.50$ ). Некоторое уширение гребней на Pd происходило из-за огибания Pd неровностей в GaAs и соответствовало толщине пленки металла.

На рис. 1 также показана морфология окисленных поверхностей GaAs после травления в ферроцианидном травителе (с) и в травителе Сиртла (d). Из сравнения микрофотографий (рис. 1, а и с, d) видно, что после травления морфология поверхности сильно изменилась: вместо гребней наблюдались холмы размером  $160 \times 100 \text{ nm}$  и плотностью  $10^{10} \text{ cm}^{-2}$  для поверхности, травленной в ферроцианидном травителе, и плотностью  $\sim 10^9 \text{ cm}^{-2}$  — в травителе Сиртла. Для первой поверхности  $h \approx 8.0 \text{ nm}$  и  $\Phi \approx 2.33$ , а для второй  $h \approx 4.0 \text{ nm}$  и  $\Phi \approx 2.31$ . Как и без травления, поверхность Pd практически повторяла микрорельеф GaAs. Морфология травленной поверхности GaAs практически не зависела от времени травления.

2. Электрофизические характеристики. Результаты измерений и расчетов, полученных из измерений и анализа ВАХ в темноте и на свету, приведены в таблицах 1–4. В этих таблицах  $\varphi_B$  — высота барьера на контакте Pd/GaAs, полученная в предположении преобладания эмиссии Шоттки путем экстраполяции экспоненциального участка прямой ветви ВАХ к напряжению  $V = 0$ ;  $m$  — фактор идеальности диода, определенный по наклону этой экспоненциальной части [11];  $V_{ph}$  — напряжение холостого хода;  $j_{ph}$  — плотность тока короткого замыкания. Плотность поверхностных состояний (ПС), обменивающихся носителями заряда с полупроводником, рассчитывалась из экспериментальных измерений величины  $m$  по формуле [12]

$$m = 1 + \frac{d_I}{\varepsilon_I} \cdot \frac{\varepsilon_S}{w} + \frac{q^2 N_{SS} d_I}{\varepsilon_0 \cdot \varepsilon_I}, \quad (1)$$

где  $q$  — заряд электрона;  $N_{SS}$  — плотность ПС в  $\text{eV}^{-1} \cdot \text{cm}^{-1}$ ;  $d_I$  — толщина оксида;  $\varepsilon_I, \varepsilon_S, \varepsilon_0$  — относительная диэлектрическая проницаемость оксида, полупроводника и абсолютная диэлектрическая проницаемость вакуума соответственно;  $w$  — толщина области пространственного заряда в полупроводнике; при расчете  $N_{SS}$  принималось  $\varepsilon_I = 9$ , как для арсената галлия [6], а  $d_I = 3 \text{ nm}$ .

Остальные параметры, приведенные в таблицах, характеризуют степень воздействия водорода концентрацией 0.6% при температуре  $\approx 100^\circ\text{C}$ :  $\Delta\varphi_B$  — изменение высоты барьера,  $\Delta V_{ph}$  — изменение напряжения холостого хода (фотоэдс),  $\Delta j$  — изменение плотности обратного тока через диод при  $V = -0.3 \text{ V}$  на Pd под действием водорода.

**Таблица 1.** Влияние травления поверхности полупроводника в травителе Сиртла на некоторые характеристики водородочувствительных ДШ на GaAs при  $T \approx 27^\circ\text{C}$

| $\Delta d, \mu\text{m}$ | $\varphi_B, \text{V}$ | $m$  | $N_{SS}, \text{eV}^{-1} \cdot \text{cm}^{-1}$ | $V_{ph}, \text{V}$ | $j_{ph}, \text{A} / \text{cm}^2$ |
|-------------------------|-----------------------|------|---|--------------------|----------------------------------|
| 0                       | 0.89                  | 1.17 | $2.6 \cdot 10^{12}$                           | 0.5                | $9.5 \cdot 10^{-3}$              |
| 0.2                     | 0.76                  | 1.36 | $5.8 \cdot 10^{12}$                           | 0.37               | $9.5 \cdot 10^{-3}$              |
| 0.7                     | 0.67                  | 1.44 | $7.1 \cdot 10^{12}$                           | 0.29               | $6.7 \cdot 10^{-3}$              |
| 2.0                     | 0.61                  | 1.83 | $1.4 \cdot 10^{13}$                           | 0.22               | $4.5 \cdot 10^{-3}$              |

2а. Диоды Шоттки на GaAs. Травление в ферроцианидном травителе не изменяло значений  $\varphi_B, m, V_{ph}, N_{SS}$  и характеристик чувствительности к водороду в диодах на GaAs. Следовательно, изменение микрорельефа поверхности GaAs и Pd (ср. рис. 1, а и с) в указанных пределах не приводило к изменению адсорбционной активности поверхностей катализатора (Pd) к водороду.

В табл. 1, 2 приведены данные для таких диодов, поверхность полупроводника в которых была протравлена в травителе Сиртла в течение 3, 11 и 30 с. Видно, что наблюдается значительное изменение как параметров и характеристик диода ( $\varphi_B, m, V_{ph}, N_{SS}$ ), так и чувствительности его к водороду. Абсолютная чувствительность к водороду по изменению плотности обратного тока  $\Delta j$  через диод увеличивалась в 8–37 раз в зависимости от толщины стравленного слоя  $\Delta d$  (колонка 5 в табл. 2).

Увеличение чувствительности сопровождалось уменьшением величины барьера. При этом происходило уменьшение барьерной фотоэдс на 0.28 V, согласующееся с уменьшением  $\varphi_B$  (ср. колонки 2 и 5 в табл. 1).

Из табл. 2 следует, что уменьшение высоты барьера под действием водорода  $\Delta\varphi_B \approx \Delta V_{ph}$  практически не зависит от его исходной величины. Однако долю увеличения отклика тока под действием водорода, связанную с уменьшением  $\varphi_B$ , можно найти из очевидного в предположении эмиссии Шоттки соотношения

$$\frac{\Delta j_t}{\Delta j_n} = \exp \left\{ q \frac{(\varphi_{Bn} - \varphi_{Bt}) + (\Delta\varphi_{Bt} - \Delta\varphi_{Bn})}{kT} \right\}, \quad (2)$$

где индексы  $t$  и  $n$  относятся к травленной и нетравленной поверхностям GaAs соответственно.

Выражение (2) справедливо, когда  $\Delta j$  много больше разности плотностей токов после и до воздействия водорода, что выполнялось на практике. Данные расчета приведены в колонке 7 (табл. 2). В колонке 6 этой таблицы значение данного отношения получено непосредственным делением величин изменения обратного тока под действием водорода для диодов с травленной и нетравленной поверхностями. Видно, что эти отношения согласуются только по порядку величины. Если показатель  $m < 1.5$ , то увеличение чувствительности больше, чем предсказывает уменьшение барьера, а при  $m \approx 1.8$  — меньше. В обоих случаях наличие оксида и увеличение плотности ПС, соответствующее увеличению величины  $m$ , должны приводить к относительноному уменьшению эффекта действия водорода, связанного с уменьшением высоты барьера: в первом случае из-за влияния сопротивления оксида [6], а во втором случае из-за увеличения экранировки ПС. В последнем случае ( $m \approx 1.8$ ), видно, экранировка настолько велика, что реальный эффект увеличения чувствительности меньше, чем предсказываемый уменьшением высоты барьера. Наблюдающееся для этого случая значительное уменьшение тока короткого замыкания свидетельствует об увеличении рекомбинации в диоде.

В связи с тем что увеличение чувствительности к водороду после травления обычно больше, чем пред-

**Таблица 2.** Влияние травления поверхности полупроводника в травителе Сиртла на некоторые характеристики водородочувствительных ДШ на GaAs при  $T \approx 100^\circ\text{C}$ 

| $\Delta d, \mu\text{m}$ | $\varphi_B, \text{V}$ | $\Delta\varphi_B, \text{V}$ | $\Delta V_{ph}, \text{V}$ | $\Delta j, \text{A/cm}^2$ | $\Delta j_i/\Delta j_n,$<br>эксперимент | $\Delta j_i/\Delta j_n,$<br>теория |
|-------------------------|-----------------------|-----------------------------|---------------------------|---------------------------|---|------------------------------------|
| 0                       | 0.86                  | 0.17                        | 0.16                      | $4.9 \cdot 10^{-4}$       |   |                                    |
| 0.2                     | 0.80                  | 0.16                        | 0.23                      | $4.0 \cdot 10^{-3}$       | 8                                       | 3                                  |
| 0.7                     | 0.75                  | 0.13                        | 0.20                      | $4.5 \cdot 10^{-3}$       | 9                                       | 3                                  |
| 2.0                     | 0.70                  | 0.14                        | 0.15                      | $1.8 \cdot 10^{-2}$       | 37                                      | 60                                 |

**Таблица 3.** Влияние травления в ферроцианидном травителе на некоторые характеристики водородочувствительных ДШ на GaAs с КЯ/СС/КТ и с КТ/СС/КЯ при  $T \approx 27^\circ\text{C}$ 

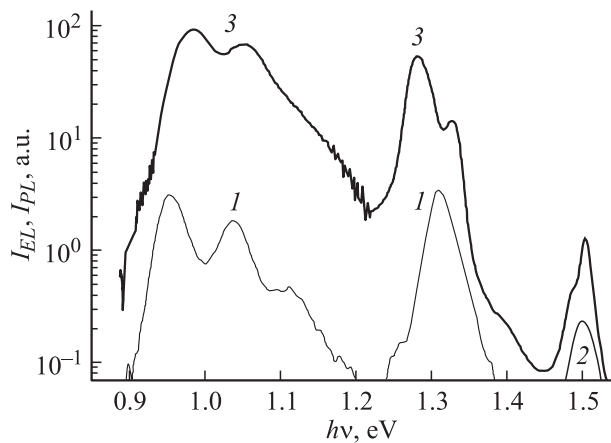
| Образец  | $\Delta d, \text{nm}$ | $\varphi_B, \text{V}$ | $m$  | $N_{SS}, \text{eV}^{-1} \cdot \text{cm}^{-1}$ | $V_{ph}, \text{V}$ | $j_{ph}, \text{A/cm}^2$ |
|----------|-----------------------|-----------------------|------|---|--------------------|-------------------------|
| КЯ/СС/КТ | 0                     | 0.64                  | 1.17 | $2.8 \cdot 10^{12}$                           | 0.20               | $8.9 \cdot 10^{-3}$     |
|          | 25                    | 0.74                  | 1.95 | $1.6 \cdot 10^{13}$                           | 0.23               | $4.2 \cdot 10^{-5}$     |
|          | 50                    | 0.81                  | 1.4  | $6.4 \cdot 10^{12}$                           | 0.48               | $8.1 \cdot 10^{-3}$     |
| КТ/СС/КЯ | 0                     | 0.67                  | 1.17 | $2.8 \cdot 10^{12}$                           | 0.23               | $7.6 \cdot 10^{-3}$     |
|          | 25                    | 0.73                  | 1.83 | $1.4 \cdot 10^{13}$                           | 0.21               | $3.6 \cdot 10^{-4}$     |
| GaAs     | 0                     | 0.86                  | 1.15 | $2.3 \cdot 10^{12}$                           | 0.5                | $9.5 \cdot 10^{-3}$     |

**Таблица 4.** Влияние травления в ферроцианидном травителе на характеристики водородочувствительных диодов на GaAs с КЯ/СС/КТ и с КТ/СС/КЯ при  $T \approx 100^\circ\text{C}$ 

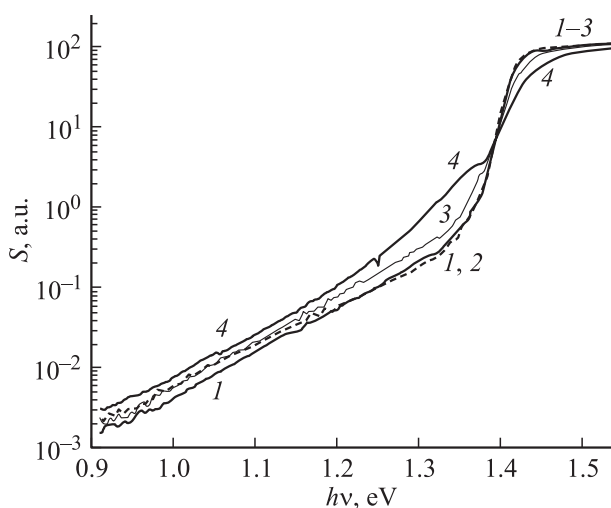
| Образец  | $\Delta d, \text{nm}$ | $\varphi_B, \text{V}$ | $\Delta\varphi_B, \text{V}$ | $\Delta V_{ph}, \text{V}$ | $j_{ph}, \text{A/cm}^2$ | $\Delta j_i/\Delta j_n,$<br>эксперимент | $\Delta j_i/\Delta j_n,$<br>теория |
|----------|-----------------------|-----------------------|-----------------------------|---------------------------|-------------------------|---|------------------------------------|
| КЯ/СС/КТ | 0                     | 0.69                  | 0.09                        | 0.18                      | $7.4 \cdot 10^{-2}$     |   |                                    |
|          | 25                    | 0.86                  | 0.10                        | 0.12                      | $1.0 \cdot 10^{-4}$     | 740                                     | 292                                |
|          | 50                    | 0.89                  | 0.26                        | 0.26                      | $1.7 \cdot 10^{-3}$     | 43                                      | 32                                 |
| КТ/СС/КЯ | 0                     | 0.75                  | 0.20                        | 0.19                      | $9.0 \cdot 10^{-2}$     |   |                                    |
|          | 25                    | 0.84                  | 0.12                        | 0.12                      | $4.8 \cdot 10^{-4}$     | 187                                     | 60                                 |
| GaAs     | 0                     | 0.86                  | 0.17                        | 0.16                      | $4.9 \cdot 10^{-4}$     |   |                                    |

сказывается уменьшением высоты барьера, оно может быть также обусловлено изменением адсорбционной активности поверхностей Pd и оксид/Pd вследствие изменения микрорельефа. Однако последнее маловероятно, так как травленная в травителе Сиртла поверхность GaAs имеет менее выраженный микрорельеф по сравнению с исходной, судя по фрактальному числу и по сравнению с микрорельефом поверхности, полученной после травления в ферроцианидном травителе. Наблюдающийся после травления рост обратного тока и чувствительности к водороду частично может быть связан с увеличением рекомбинационной компоненты тока через диод. О наличии такого тока прямо свидетельствовало наблюдение электролюминесценции в диодах на GaAs, соответствующее межзонной рекомбинации в GaAs (рис. 2, кривая 2). Таким образом, можно заключить, что причиной увеличения чувствительности к водороду после травления является изменение состояния поверхности GaAs из-за химического взаимодействия полупроводника и травителя.

На рис. 3 показаны спектры фоточувствительности малосигнальной фотоэкс диодов на GaAs до и после травления, которые, согласно [15], могут быть использованы для обнаружения ПС на поверхности GaAs, локализованных в нижней половине запрещенной зоны полупроводника или глубоких уровней в GaAs. Из рис. 3 видно, что наблюдалась относительно пологая широкая область фоточувствительности в интервале энергий от 0.9 до 1.35 eV, в которой фоточувствительность увеличивалась с ростом энергии почти по экспоненциальному закону в соответствии с обычно наблюдаемым для реальной поверхности GaAs ростом плотности ПС к потолку валентной зоны [6]. По мере увеличения времени травления фоточувствительность в этой области спектра незначительно увеличивалась. При переходе барьера в подложку (толщина стравленного слоя  $\approx 2 \mu\text{m}$ ) наблюдалось значительное (в 4 раза) возрастание фоточувствительности в диапазоне 1.28–1.38 eV, что соответствует, по-видимому, увеличению плотности до-



**Рис. 2.** Спектры электролюминесценции (1, 2) и фотолюминесценции (3). 1 — диод на GaAs с КЯ/СС/КТ, 2 — диод на GaAs, 3 — полупроводник с КЯ и КТ.



**Рис. 3.** Влияние травителя Сиртгла на спектры фоточувствительности ДШ на GaAs.  $\Delta d$ ,  $\mu\text{m}$ : 1 — 0, 2 — 0.2, 3 — 0.7, 4 — 2.0.

норных ПС и качественно согласуется с увеличением величины  $m$ , отмеченным выше.

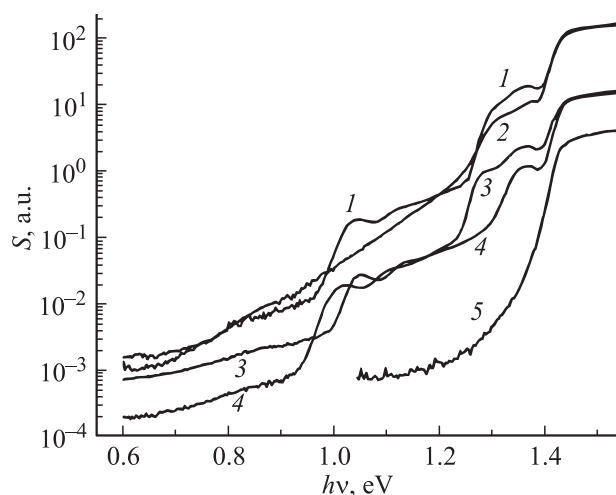
2b. Диоды Шоттки на GaAs с КЯ и КТ. Роль КЯ и КТ, встраиваемых в ОПЗ GaAs диодов Шоттки, оказалось возможным выявить после травления их ферроцианидным травителем, который как отмечено выше, не изменял основных параметров диодов на GaAs и их чувствительности к водороду.

На рис. 4 показаны спектры фоточувствительности для диодов с КТ/СС/КЯ и КЯ/СС/КТ до и после травления ферроцианидным травителем. Из рисунка видно, что с помощью этого травителя можно довольно точно травить весьма тонкие слои в приповерхностной области полупроводника. После травления слоя толщиной  $\approx 25$  нм пропадал сигнал от КТ (в области 1.0–1.2 эВ), но сохранялся сигнал от КЯ (1.30–1.37 эВ) [10] в диодах с КТ/СС/КЯ (кривые 1, 2),

а в диодах с КЯ/СС/КТ исчезал сигнал от КЯ (кривые 3, 4), но сохранялся сигнал от КТ. После травления слоя толщиной  $\approx 50$  нм на кривой спектральной чувствительности отсутствовал сигнал как от КЯ, так и от КТ (кривая 5).

В табл. 3, 4 содержатся результаты влияния такого травления на характеристики диодов с КЯ и КТ. Видно, что после травления КЯ или КТ увеличивались значения величин  $\phi_B$  (до 0.1 В),  $V_{ph}$ ,  $m$ ,  $N_{SS}$  и уменьшались значения плотности тока короткого замыкания  $j_{ph}$ . Вероятно, что уменьшение  $j_{ph}$  при травлении КЯ или КТ связано с ростом толщины и, следовательно, сопротивления пленки оксида вследствие возможного дополнительного окисления In, который имелся в приповерхностном слое GaAs в оставшихся после травления слоях InAs или InGaAs. После травления слоя полупроводника толщиной 50 нм, когда КЯ и КТ исчезали, ток короткого замыкания снова увеличивался и соответствовал окисленной поверхности GaAs.

Стравливание КЯ и КТ приводило к уменьшению чувствительности к водороду по  $\Delta j$  в 740 раз после травления КЯ и в 187 раз после травления КТ. Роль изменения высоты барьера на величину токовой чувствительности оценивалась по формуле (2). При этом рассчитанные отношения  $\Delta j_n/\Delta j_t$  ( $\Delta j_n$  и  $\Delta j_t$  — чувствительности к  $\text{H}_2$  до и после травления соответственно) оказывались одного порядка, но всегда меньше, чем экспериментально измеренные отношения (таблица 4, колонки 8 и 7 соответственно). Ранее [16] была показана возможность увеличения чувствительности к водороду в планарной резистивной структуре с Pd контактами на полуизолирующем GaAs после введения КЯ и КТ в ОПЗ полупроводника на 1–2 порядка величины. Поэтому травление КЯ и КТ, наоборот, уменьшает чувствительность к водороду более чем на 2 порядка



**Рис. 4.** Кривые спектральной чувствительности фотоэда ДШ с КТ/СС/КЯ (кривые 1, 2) и с КЯ/СС/КТ (кривые 3–5). 1, 3 — до травления; 2, 4 — после травления в ферроцианидном травителе слоя толщиной  $\Delta d \approx 25$  нм соответственно; 5 —  $\Delta d \approx 50$  нм.

величины, что качественно согласуется с результатами работы [16].

Большой, чем ожидалось в связи с изменением высоты барьера, эффект уменьшения чувствительности к  $H_2$  при травлении КЯ или КТ, вероятно, связан с задержкой водорода на поверхности полупроводника напряженными слоями InGaAs и InAs [9], так как в диодах с некантованными, ненапряженными слоями  $In_{1-x}Ga_xAs$  и InAs эффект очувствления был значительно меньше, чем в аналогичных диодах с напряженными слоями.

Присутствие КЯ и КТ в ОПЗ GaAs также может увеличивать рекомбинационную составляющую тока через диод. О существенной роли рекомбинации в ОПЗ через КЯ и КТ свидетельствуют спектры электролюминесценции, представленные на рис. 2. Из рис. 2 (кривая 3) видна мощная люминесценция в области КТ (уровни энергии 0.95, 1.025, 1.11 eV от основного, первого и второго и возбужденных уровней квантования) и в области КЯ ( $\approx 1.31$  eV). Интересно, что спектры электролюминесценции имели лучшее разрешение особенно в области свечения от КТ, чем спектры фотолуминесценции, полученные от полупроводника, на котором были сделаны диоды (ср. кривые 1 и 3 на рис. 2).

Травление и введение квантовых слоев не изменяли быстродействия диодов как датчиков водорода, однако значительно увеличивали их обнаружительную способность от  $10^{-2}$  до  $10^{-3}$ – $10^{-4}\%$ . Следует также отметить, что при малых концентрациях  $H_2$  (до  $10^{-2}\%$ ) величина  $\Delta j$  линейно увеличивалась с ростом концентрации водорода, что также представляет интерес для технической разработки сенсоров.

## Заключение

Обнаружено, что модификация поверхности полупроводника в диодах Шоттки с каталитически активным электродом из Pd путем неполирующего травления или введения в область пространственного заряда полупроводника на расстоянии 15 nm от поверхности слоев квантовых ям (InGaAs) и квантовых точек (InAs) может увеличивать чувствительность к водороду в первом случае в  $\approx 10$ –40 раз, а во втором — более чем на 2 порядка величины. Показано, что это увеличение можно связать с уменьшением высоты потенциального барьера Pd/GaAs задержкой диффузии водорода в глубь полупроводника напряженными слоями КЯ и КТ и влиянием рекомбинационной составляющей тока. Установлено, что введение КЯ и КТ в область пространственного заряда приводит к увеличению рекомбинационного тока и к возникновению электролюминесценции, связанной с рекомбинацией в КЯ и КТ, а увеличение обратного тока после травления в диодах на GaAs сопровождалось электролюминесценцией, соответствующей межзонной рекомбинации в GaAs.

Авторы выражают благодарность И.А. Карповичу за полезное обсуждение результатов и Б.Н. Звонкову за изготовление слоев полупроводника.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (грант № 00-02-17598).

## Список литературы

- [1] Евдокимов А.В., Мушудли М.Н., Подлепецкий и др. // Зарубежная электронная техника. 1988. № 2 (321). С. 3–39.
- [2] Petersson L.G., Dunnetum H.M., Fogelbery J. et al. // J. Appl. Phys. 1985. Vol. 58. N 1. P. 404–416.
- [3] Johansson M., Lundstrom I., Ekedahi L.D. // J. Appl. Phys. 1998. Vol. 84. N 1. P. 44–51.
- [4] Гаман В.И., Дробот П.И., Дученко М.О. и др. // Поверхность. 1996. № 11. С. 64–73.
- [5] Тихов С.В., Лесников В.П., Подольский В.В. и др. // ЖТФ. 1995. Т. 65 (11). С. 120–125.
- [6] Гаман В.И., Дученко М.О., Калыгина В.М. // Изв. вузов. Физика. 1988. № 1. С. 69–83.
- [7] Слободчиков С.В., Салихов К.Н. // ФТП. 2000. Т. 34 (3). С. 290–296.
- [8] Тихов С.В., Павлов Д.А., Шляев П.А. и др. // Письма в ЖТФ. 2002. Т. 28 (9). С. 1–5.
- [9] Карпович И.А., Тихов С.В., Шоболов Б.Н. и др. // ФТП. 2002. Т. 36 (5). С. 582–586.
- [10] Карпович И.А., Анион А.В., Филатов Д.О. // ФТП. 2001. Т. 32 (9). С. 1089–1095.
- [11] Звонков Б.И., Карпович И.А., Байдусь Н.В. и др. // ФТП. 2001. Т. 35 (1). С. 92–97.
- [12] Родерик Э.К. Константы металл–полупроводник. М., 1982. 207 с.
- [13] Chesters S. et al. // Proc. of Institute of Environmental Sciences. 1990. Vol. 316.
- [14] Фредер Е. Фракталы. М.: Мир, 1991. 256 с.
- [15] Karpovich I.A., Baidus N.V., Zvonkov B.N. et al. // Nanotechnology. 2001. N 12. P. 405–429.
- [16] Карпович И.А., Тихов С.В., Шоболов Е.Л. и др. // Письма в ЖТФ. 2002. Т. 28 (8). С. 28–32.