

02;06;07;12

## Влияние водорода на фотоэлектрические свойства диодов Шоттки палладий/анодный окисел/арсенид галлия

© С.В. Тихов, Е.Л. Шоболов, В.В. Подольский, С.Б. Левичев

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

(Поступило в Редакцию 24 апреля 2002 г.)

Исследовано влияние водорода на фотоэдс и вольт-амперные характеристики диодов Шоттки палладий/анодный окисел/арсенид галлия. Определены оптимальные значения толщины окисла, при которой диоды имели высокую чувствительность к водороду, и глубина проникновения атомарного водорода в окисел. Установлен механизм воздействия водорода, заключающийся в хемсорбции атомарного водорода на поверхности арсенида галлия, что приводит к уменьшению высоты барьера и увеличению рекомбинационной составляющей тока. Показана неоднородность пленки туннельно-тонкого анодного окисла по толщине и обнаружено увеличение вероятности туннелирования через окисел под действием водорода. Установлено, что регистрация водорода по отклику фотоэдс характеризовалась большей чувствительностью и обнаружительной способностью, но меньшим быстродействием по сравнению с откликом по обратному току.

### Введение

Диоды Шоттки (ДШ) с туннельно-тонкой прослойкой диэлектрика между каталитическим выпрямляющим контактом (Pd) и полупроводником перспективны для создания быстродействующих и потребляющих малую мощность сенсоров водорода [1]. Относительно хорошо изучено воздействие водорода на свойства диодов на Si с туннельно-тонкой прослойкой специально выращенного или естественного окисла [2–6]. Диоды на GaAs менее изучены [7–9]. В большинстве работ исследования проведены на диодах с прослойкой естественного или термического окисла фиксированной толщины. Настоящая работа посвящена изучению воздействия водорода на фотоэдс и вольт-амперные характеристики (ВАХ) диодов на GaAs с прослойкой анодного окисла (АО) разной толщины.

### Методика эксперимента

Диоды получались на основе эпитаксиальных слоев  $n$ -GaAs с концентрацией электронов  $n_0 \approx 3 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$ , выращенных методом газофазной эпитаксии из металлорганических соединений (метод МОСГЭ) при атмосферном давлении на подложке GaAs ориентацией (100) +  $3^\circ$  с концентрацией электронов  $n_0 \approx 10^{16} \text{ см}^{-3}$ . Пленки АО создавались методом жидкостного анодирования в электролите состава 3%-ный водный раствор винной кислоты в этиленгликоле (1:2). Толщина пленок АО  $d_{\text{АО}}$  варьировалась в пределах 0–20 нм. Полупрозрачный электрод из Pd площадью  $\approx 8 \cdot 10^{-3} \text{ см}^2$  и толщиной  $\approx 10 \text{ нм}$  (пропускание света  $\approx 80\%$ ) наносился на неподогретую окисленную поверхность эпитаксиальной пленки методом термического напыления в вакууме. Номинальная толщина пленок АО и Pd определялась классическими способами по постоянной

анодирования и микровзвешиванием соответственно и с точностью 0.3 нм на атомном силовом микроскопе (АСМ) фирмы Torometrix® по вытравленной ступеньке. На этом микроскопе неконтактным способом также исследовался микрорельеф поверхности эпитаксиальных и окисных слоев.

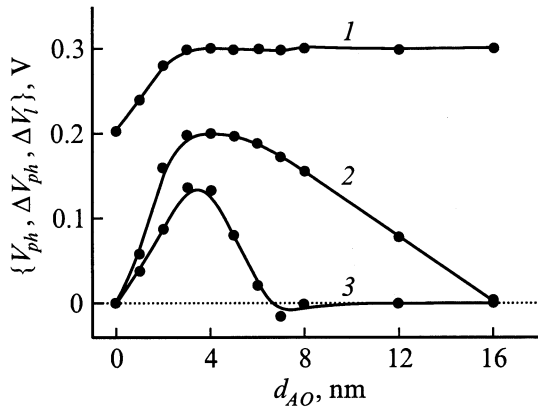
Исследовались фотоэдс в режиме разомкнутой цепи при освещении неразложенным светом вольфрамовой лампы накаливания, спектральные зависимости фотоэдс в интервале энергий фотонов 0.6–1.5 eV и вольт-амперные характеристики ДШ в интервале температур 300–420 К на воздухе и в потоке воздушно-аргоновой смеси с объемной концентрацией водорода  $P_{\text{H}} \approx 0.04$ –0.22 [8].

### Результаты эксперимента и обсуждение

Фотоэдс. Для исследованных диодов был найден диапазон температур 360–390 К, в котором их чувствительность к водороду и быстродействие были максимальными и необратимого изменения свойств не происходило.

В атмосфере, содержащей водород, фотоэдс  $V_{\text{ph}}$  всегда уменьшалась, что согласуется с имеющимися в литературе данными и объясняется уменьшением потенциального барьера в GaAs под воздействием водорода [8,9].

На рис. 1 (кривые 1, 2) показаны зависимости фотоэдс  $V_{\text{ph}}$  и ее изменения  $\Delta V_{\text{ph}}$  под действием водорода от толщины окисла. Из рисунка видно, что наблюдался рост величины  $V_{\text{ph}}$  и  $\Delta V_{\text{ph}}$  при увеличении толщины АО до 3.0 нм, затем достигалось насыщение  $V_{\text{ph}}$ , а  $\Delta V_{\text{ph}}$  проходила через максимум (3.0–5.0 нм) и уменьшалась до нуля при  $d_{\text{АО}} \approx 16 \text{ нм}$ . Рост  $V_{\text{ph}}$  (кривая 1) объясняется образованием встроенного отрицательного заряда в приповерхностном слое АО, происходящем при анодном окислении GaAs [10]. Чувствительность



**Рис. 1.** Зависимость  $V_{ph}$  (1),  $\Delta V_{ph}$  (2) и  $\Delta V_I$  (3) от толщины окисла.  $T \approx 390$  К,  $P_H \approx 0.22\%$ .

к водороду появляется только после образования на поверхности GaAs слоя окисла некоторой минимальной толщины (кривая 2) и растет с ростом толщины окисла из-за уменьшения доли образования нечувствительного к водороду соединения GaAs с Pd [11].

Спад величины  $\Delta V_{ph}$  с ростом толщины окисла при постоянном значении  $V_{ph}$  свидетельствует об уменьшении концентрации атомарного водорода, достигающего границы Pd/GaAs, и значение  $d_{AO} \approx 16$  nm, при котором чувствительность к водороду практически исчезает, характеризует, таким образом, глубину его проникновения в АО при температуре измерений (390 К).

Другой характеристикой чувствительности ДШ к водороду может служить сдвиг прямой ветви ВАХ при фиксированном значении тока  $\Delta V_I$  [4]. Видно (кривая 3), что в отличие от зависимости  $\Delta V_{ph}(d_{AO})$  спад  $\Delta V_I$  с ростом толщины окисла происходит при меньших толщинах и наблюдается даже смена знака  $\Delta V_I$  при  $d_{AO} \approx 7$  nm, соответствующая уменьшению прямого тока под действием водорода.

Было установлено, что при используемой для измерений фотоэдс интенсивности света ее изменение соответствовало изменению величины барьера в полупроводнике. Наблюдающийся при этом меньший отклик на водород по  $\Delta V_I$ , чем по  $\Delta V_{ph}$ , и его более резкий спад с ростом  $d_{AO}$  естественно объяснить уменьшением тока и его водородочувствительной составляющей из-за роста сопротивления окисла.

Дальнейшие результаты, излагаемые в данной работе, относятся к диодам с  $d_{AO} \approx 3.4$  nm, имеющим максимальную чувствительность к водороду как по изменению фотоэдс, так и по изменению тока.

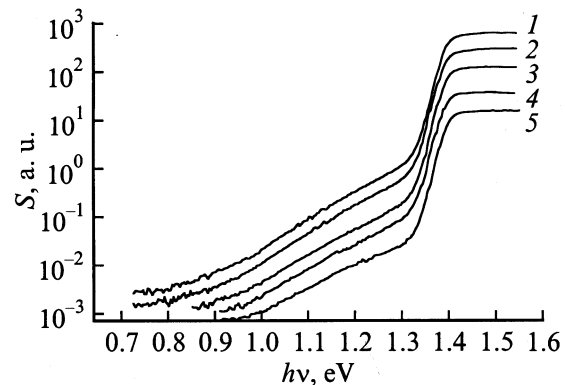
Так как изменение работы выхода из контакта Шоттки обычно незначительно изменяет состояние поверхности GaAs [12], то уменьшение барьера Pd/GaAs под действием водорода можно связать для исследуемых диодов либо с ростом концентрации протонов на границе АО/GaAs из-за хемосорбции атомарного водорода, либо с уменьшением плотности отрицательно заряженных

поверхностных состояний (ПС) на этой границе из-за пассивирующего действия водорода. Чтобы выбрать один из этих механизмов, необходимо было найти способ тестирования плотности ПС, лежащих под равновесным уровнем Ферми и несущих отрицательный заряд, и установить влияние на них водорода. Согласно работе [13], наличие ПС, лежащих под равновесным уровнем Ферми, можно обнаружить по характерному протяженному участку примесной fotocувствительности  $S(V_{ph}/L)$ , экспоненциально возрастающей с ростом энергии фотона  $h\nu$  и наблюдающемуся в системе электролит/арсенид галлия. Аналогичные измерения были проведены нами на исследуемых диодах.

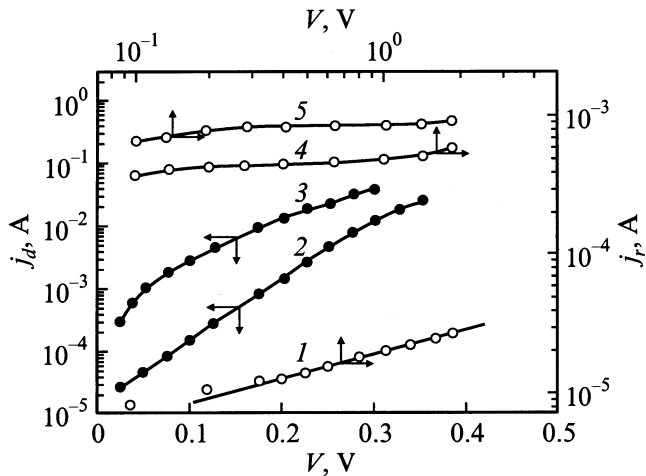
На рис. 2 показаны типичные спектральные зависимости  $S(h\nu)$ , измеренные в потоке воздуха и воздушно-аргоновой смеси с разной концентрацией водорода. На рисунке видна протяженная область примесной fotocувствительности в интервале энергий  $E_C - 0.72 - 1.32$  eV, в которой величина  $S$  практически экспоненциально растет с ростом  $h\nu$  из-за отклика от ПС. Небольшая выпуклость, наблюдаемая на фоне экспоненты, обусловлена откликом от объемных дефектов в GaAs, возникающих за-за химического взаимодействия Pd и GaAs [14]. В диодах с электродом из Au и диодных структурах с электролитическим контактом [13] эта выпуклость не наблюдалась.

Видно, что воздействие водорода, уменьшая  $S$  почти на два порядка величины, практически не уменьшает примесного фотоотклика от ПС относительно собственного от GaAs. Следовательно, плотность ПС, лежащих под уровнем Ферми, в том числе и плотность акцепторных ПС, не изменяется под воздействием водорода и уменьшение барьера в полупроводнике происходит из-за хемосорбции водорода на границе раздела АО/GaAs с образованием на ней заряда протонов. Этот вывод согласуется с аналогичным выводом, сделанным в работе [9] для водородочувствительных диодов Шоттки с термическим окислом.

Вольт-амперные характеристики и температурные зависимости токов. На рис. 3 пока-



**Рис. 2.** Зависимость fotocувствительности от энергии фотонов.  $d_{AO} \approx 3.4$  nm,  $T \approx 366$  К.  $P_H$ , %: 1 — 0, 2 — 0.021, 3 — 0.084, 4 — 0.17, 5 — 0.42.



**Рис. 3.** Влияние водорода на прямую (2, 3) и обратную (1, 4, 5) ветвь вольт-амперной характеристики. 1, 2 — в потоке воздуха, 3–5 — в потоке воздушно-аргоновой смеси с  $H_2$ .  $P_H$ , %: 3, 5 — 0.22, 4 — 0.022;  $T \approx 390$  К;  $d_{AO} \approx 3.4$  nm.

заны ВАХ диодов, измеренные при  $\approx 390$  К в потоке воздуха (кривые 1, 2) и в потоке воздушно-аргоновой смеси с  $H_2$  разной концентрации (кривые 3–5). Видно, что воздействие водорода, увеличивая плотности токов  $j$  (примерно на 1–2 порядка величины), вызвало значительное изменение формы ВАХ. Прямая ветвь ВАХ сильно отклонялась от экспоненты даже при малых напряжениях, имея тенденцию к насыщению с ростом величины прямого смещения ( $V > 0$  на Pd). Обратная ветвь практически насыщалась с ростом  $V < 0$  по сравнению с зависимостью  $j \sim \sqrt{V}$  (ср. кривые 1 и 4, 5), наблюдавшейся в потоке воздуха.

Обычно при анализе ВАХ диодов Шоттки с туннельно-тонким окислом учитываются надбарьерная эмиссия и туннелирование через окисел согласно формуле [9,15]

$$j = AT^2 T_n(V) \times \exp\left(-\frac{q\phi_S(V) + qV + E_C - F}{kT}\right) \left[\exp\left(\frac{qV}{kT}\right) - 1\right], \quad (1)$$

где  $A$  — постоянная Ридхарсона–Шоттки,  $T_n(V)$  — вероятность туннелирования,  $q$  — заряд электрона,  $k$  — постоянная Больцмана,  $\phi_S(V)$  — поверхностный потенциал полупроводника,  $E_C - F$  — энергетический зазор между дном зоны проводимости  $E_C$  и равновесным уровнем Ферми  $F$  в объеме полупроводника.

Для выяснения механизма токопереноса и влияния водорода на исследованные диоды были проведены измерения температурных зависимостей плотностей прямого  $j_d$  и обратного  $j_r$  токов при разных напряжениях и разной концентрации водорода. Эти зависимости показаны на рис. 4. Видно, что все они имели экспоненциальный характер в соответствии с (1) и, как показал анализ, характеризовались большими значениями энер-

гии активации, изменяющимися в зависимости от знака и величины смещения и концентрации водорода.

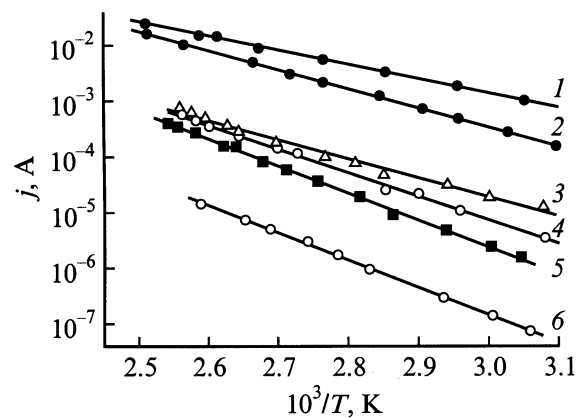
Энергия активации обратного тока  $E_r$  не зависела от напряжения смещения и составляла в потоке воздуха  $\approx 1.0$  eV. Это значение было близко к значению высоты барьера Pd/GaAs  $q\phi_B = q\phi_S + E_C - F \approx 1.1$  eV, значение  $\phi_S$  определялось из зависимости барьерной емкости от напряжения.

Воздействие водорода с концентрацией 0.044% на порядок увеличивало величину обратного тока, но не изменяло значения  $E_r \approx q\phi_B$ . Этот результат может быть объяснен накоплением протонов в результате хемосорбции атомарного водорода на границе окисел/полупроводник, вызывающим утоньшение барьера для туннелирования и увеличение вероятности туннелирования через пленку диэлектрика [15].

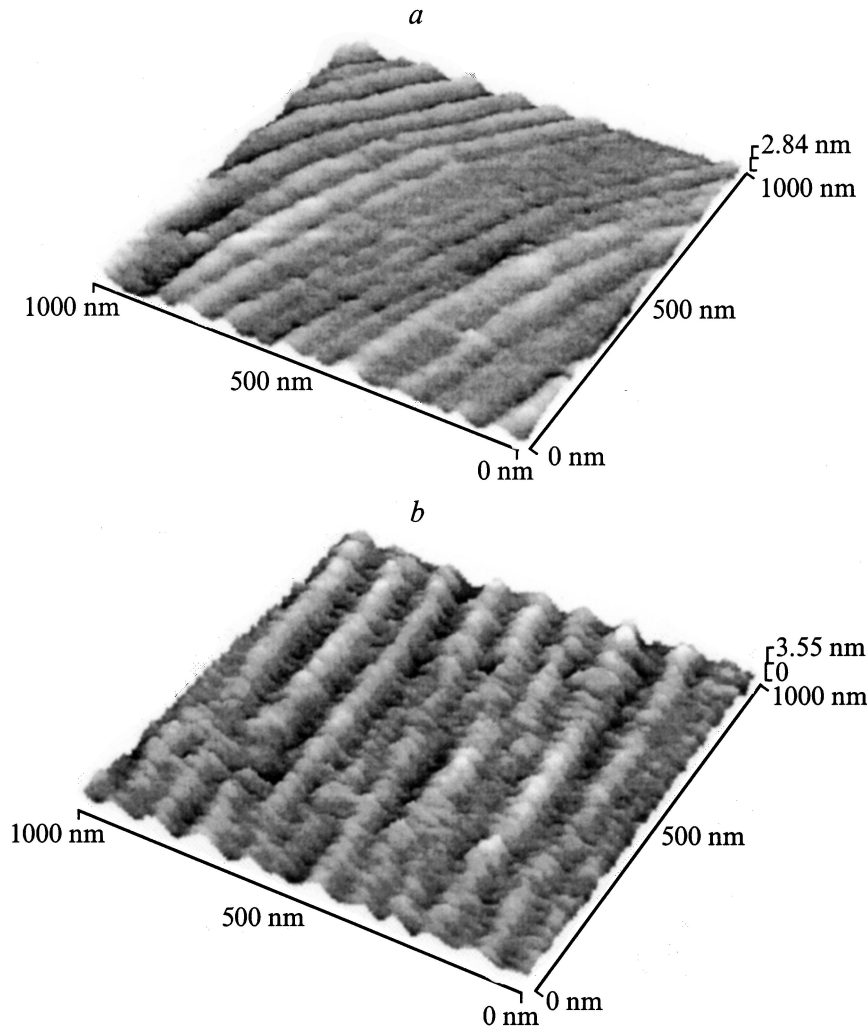
Дальнейшее увеличение  $P_H$  до значения 0.22% приводило к плавному уменьшению  $E_r$  до значения 0.65 eV (ср. кривые 3, 4 и 5). Максимальные изменения энергии активации составили  $\Delta E_r \approx 0.35$  eV, что, вероятно, равно изменению высоты барьера на границе Pd/GaAs после воздействия водорода.

Энергия активации прямого тока  $E_d$  уменьшалась с ростом  $V > 0$  и  $P_H$  (рис. 4, кривые 1, 2). Максимальное уменьшение  $\Delta E_d$  под действием водорода  $P_H \approx 0.22\%$  составило  $\approx 0.19$  eV.

Общим для температурных зависимостей  $j_r$  и  $j_d$  был тот факт, что изменения токов при фиксированной температуре были значительно меньше, чем это следовало бы ожидать из-за изменения значения энергии активации как при воздействии водорода, так и при увеличении прямого смещения на диоде. Например, при  $T \approx 333$  К, как можно определить из рис. 4, при воздействии водорода наблюдалось увеличение  $j_d$  в 4 раза, а исходя из уменьшения  $E_d$  на 0.19 eV, следовало ожидать увеличения в 785 раз; для  $j_r$  увеличение составило 13.6 раз против ожидаемого  $2.2 \cdot 10^5$  раз. Это расхождение естественно объяснить в рамках принятой модели влиянием туннельно-тонкой диэлектрической прослойки.



**Рис. 4.** Температурные зависимости прямого (1, 2) и обратного (3–6) токов при разной концентрации водорода.  $V$ , V: 1, 2 — +0.3; 3–6 — -1.  $P_H$ , %: 2, 6 — 0; 1, 3 — 0.22; 4 — 0.11; 5 — 0.044.  $d_{AO} \approx 3.4$  nm.



**Рис. 5.** Изображение поверхности эпитаксиальной пленки (а) и слоя окисла (b) номинальной толщины  $\approx 3.4$  нм, полученное на атомном силовом микроскопе.

Согласно выражению (1), отношение экспериментально наблюдаемого увеличения тока к ожидаемому при данном уменьшении величины энергии активации под действием водорода при фиксированных температуре и напряжении равно вероятности туннелирования через окисел. Тогда для обратно-смещенного диода при 333 К и  $V = -1$  В  $T_n \approx 6.2 \cdot 10^{-5}$  и расчет по формуле [15]

$$\eta_0 = [\ln(T_n)]^2 / (100d_0), \quad (2)$$

где  $\eta_0$  — эффективная высота барьера для туннелирования в eV, а  $d_0$  — толщина барьера в нм, дает значение  $\eta_0 \approx 0.08$  eV, если принять эффективную массу электрона равной массе покоящегося электрона в вакууме, и  $d_0 = d_{AO}$ .

Такое же значение  $\eta_0$  получается для прямо смещенного диода. Это значение сильно расходится с высотой барьера АО/GaAs (1.6 eV), полученной в [16]. Используя формулу (2), при  $\eta_0 = 1.6$  eV получим значение  $d_0 \approx 0.6$  нм. Известно, что анодные окисные

пленки малой толщины имеют утоньшения, обусловленные заросшими порами [17]. Очевидно, из-за этих утоньшений эффективная толщина окисла оказывается меньше его номинальной толщины  $d_{AO}$ , и это может приводить к ошибке в определении высоты барьера для туннелирования при расчете по (2).

Наличие утоньшений в окисле можно установить с помощью измерений на атомном силовом микроскопе, сравнивая микрорельефы исходной и окисленной поверхностей эпитаксиального слоя GaAs. Морфология таких поверхностей, полученная с помощью АСМ, показана на рис. 5. Из рисунка видно, что исходная поверхность характеризовалась наличием ступеней роста с некоторыми зачатками бугорков по всей их протяженности (а), а на поверхности, покрытой анодным окислом номинальной толщины  $\approx 3.4$  нм (b), видно разрастание таких бугорков также по всей протяженности ступеней. Разрастание, вероятно, связано с преимущественным ростом окисла в области наибольшей напряженности электрического поля (в местах зачатков бугорков). Та-

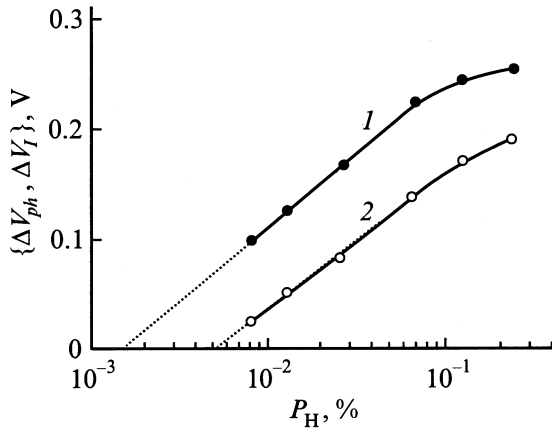


Рис. 6. Зависимости стационарного отклика  $\Delta V_{ph}$  (1) и  $\Delta V_l$  (2) от  $P_H$ .  $T \approx 370$  К,  $d_{AO} \approx 3.4$  нм.

ким образом, как следует из сравнения микрорельефа, после анодного окисления шероховатость поверхности возрастает, причем пленка анодного окисла оказывается весьма неоднородной по толщине. Компьютерный анализ микрорельефа показал, что средняя шероховатость поверхности увеличивается от значения 0.25 нм (для неокисленной поверхности) до 0.55 нм (для окисленной поверхности). Максимальный размер неоднородности (от впадины до вершины) в окисле достигает 2.6 нм. Следовательно, можно заключить, что утоньшения в окисле могут достигать разницы между номинальной толщиной и максимальным размером неоднородности, т.е. значения 0.8 нм. Последнее значение несколько больше, чем рассчитанное выше значение  $d_0 \approx 0.6$  нм.

Небольшое, уже с учетом неоднородности толщины пленки количественное несоответствие теории и эксперимента может быть объяснено неучетом рекомбинационной компоненты тока через диод, связанной, например, с рекомбинацией через ПС [15], которая складывается с током надбарьерной эмиссии, тогда ожидаемое увеличение тока оказывается еще больше, чем предсказывается эмиссией Шоттки, а вероятность туннелирования оказывается меньше полученной выше ( $6.2 \cdot 10^{-5}$ ).

О необходимости учета рекомбинационной компоненты тока свидетельствуют наличие участка  $j \sim \sqrt{V}$  на обратной ветви ВАХ при малых  $V$ , соответствующего механизму термогенерации [12], и прямое наблюдение электролюминисценции в исследованных диодах при прямом смещении. Уменьшение барьера в полупроводнике при воздействии водорода, по-видимому, увеличивает рекомбинацию, что выражается в изменении формы ВАХ: отклонением прямой ветви ВАХ от экспоненты при всех напряжениях и стремлением к насыщению с ростом напряжения как прямой, так и обратной ветви ВАХ. Такое поведение ВАХ диодов Шоттки теоретически предсказано в работе [15] превалярованием рекомбинации через ПС. Следует заметить, что учет такой рекомбинации сохраняет экспоненциальные зависимости

прямого и обратного тока от обратной температуры через диод с одним наклоном в исследованном сравнительно узком диапазоне температур и непрерывное уменьшение энергии активации тока с ростом концентрации водорода.

В связи с существенным вкладом рекомбинационной составляющей тока в исследованных диодах проблематичным оказывается определение изгиба зон в полупроводнике по формуле (1) и плотности ПС дифференцированием прямой ветви ВАХ по способу [9]. Таким образом, хемосорбция водорода на границе АО/GaAs приводит не только к возрастанию на ней плотности положительного заряда и увеличению вероятности туннелирования через окисел, но и увеличивает рекомбинационную активность этой границы.

Характеристики диодов как газовых сенсоров. На рис. 6 показаны зависимости стационарного изменения величин  $\Delta V_{ph}$  и  $\Delta j$  от концентрации водорода при  $T \approx 370$  К. Видно, что  $\Delta V_{ph}$  и  $\Delta j$  увеличивались  $\sim \lg P_H$  и стремились к насыщению при  $P_H \geq 10^{-1}\%$ , что характерно для такого рода зависимостей [8]. Чувствительность к водороду (изменение напряжения при данной концентрации) оказывалась выше по фотоэдс, чем по сдвигу  $\Delta V_l$ . Также регистрация воздействия водорода по  $\Delta V_{ph}$  давала большую обнаружительную способность, полученную экстраполяцией логарифмической части отклика к значению  $\Delta V_{ph} = 0$ , чем по  $\Delta V_l$ . Таким образом, обнаружительная способность к водороду исследованных ДШ была  $\sim 10^{-3}\%$ , что несколько уступает таковой для диодов на основе GaAs с естественным окислом ( $\sim 10^{-4}\%$ ). Однако, как показали исследования кинетики водородного отклика, быстродействие диодов с АО оказывается не ниже, чем в лучших ДШ на основе Si и GaAs [5,8].

Кинетика изменения тока и фотоэдс при воздействии водорода в целом была неэкспоненциальной, что соответствует гетерогенному механизму адсорбции и десорбции водорода в диодах с Pd [1]. В связи с

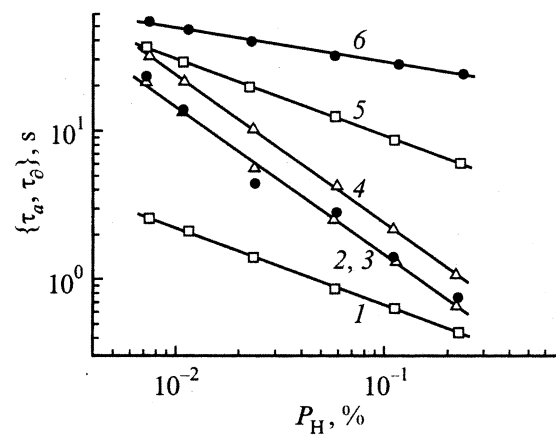


Рис. 7. Зависимости  $\tau_a$  (2-4) и  $\tau_d$  (1, 5, 6) от  $P_H$ , полученные из кинетики  $\Delta V_{ph}$  (3, 6),  $\Delta I_d$  (2, 5) и  $\Delta I_r$  (1, 4) при различном напряжении смещения.  $V$ , В: 1 — -0.3; 2 — +0.4; 4, 5 — +0.3.  $T \approx 370$  К,  $d_{AO} \approx 3.4$  нм.

этим за характеристику релаксационного процесса мы примем некоторые времена адсорбции  $\tau_a$  и десорбции  $\tau_d$  при включении и выключении водорода соответственно, измеренные на уровне 0.5 от максимального изменения величины.

На рис. 7 показаны зависимости  $\tau_a$  и  $\tau_d$  от  $P_H$  при  $T \approx 370$  К, измеренные по кинетике  $\Delta V_{ph}$ ,  $\Delta j_d$  и  $\Delta j_r$ . Из рисунка следует, что значения  $\tau_a$  и  $\tau_d$  в исследованном диапазоне  $P_H$  изменялись в пределах 0.6–50 с, что отвечает высокому быстродействию диодов как сенсоров. При адсорбции  $\tau_a$  менялось  $\sim P_H^{-1}$  (кривые 2–4), а при десорбции по току  $\sim P_H^{-1/2}$  (кривые 1, 5). Самой медленной оказалась релаксация десорбции по  $\Delta V_{ph}$  (кривая 6). При  $V > 0$  на ДШ адсорбция убыстрялась, а десорбция замедлялась (ср. кривые 2 и 5), а при  $V < 0$  — наоборот (кривые 1 и 3). Максимальное увеличение быстродействия при  $V < 0$  достигало одного порядка величины (ср. кривые 1 и 5). Заметим, что адсорбция относительно слабо зависела от напряжения и была одинаково быстрой при релаксации тока и фотоэдс (кривые 2, 3).

Влияние величины и знака электрического поля на процессы адсорбции и десорбции водорода в ДШ с АО можно связать с механизмом влияния водорода, который, видимо, наряду с диффузией атомарного водорода и его хемосорбцией на границе АО/GaAs, сопровождается дрейфом протонов. Естественно тогда, что положительное смещение ускоряет процесс адсорбции, а отрицательное — процесс десорбции.

Энергии активации адсорбции и десорбции также зависели от знака и величины смещения и составляли 0.45 и 0.49 eV при  $V = +0.3$  В и 0.4 eV и 0.3 eV для  $V = -0.3$  В соответственно.

## Заключение

В результате проведенных исследований диодов палладий/анодный оксид/арсенид галлия найдено оптимальное значение толщины АО, при котором наблюдается максимальная чувствительность к  $H_2$ . Определена эффективная глубина проникновения атомарного водорода в анодный окисел. Установлен механизм воздействия водорода, связанный с хемосорбцией водорода и образованием положительного заряда на границе АО/GaAs, дрейфом протонов и увеличением вероятности туннелирования носителей тока через окисел. Обнаружена сильная неоднородность туннельно-тонких слоев анодного окисла по толщине, сравнимая с их номинальной толщиной. Показана существенная роль рекомбинационной составляющей тока через ДШ, которая обычно не учитывается в водородочувствительных структурах на Si и GaAs. Установлено, что наибольшая чувствительность и обнаружительная способность к  $H_2$  может быть достигнута при регистрации фотоэдс, а максимальное быстродействие — при регистрации по обратному току.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (гранты № 00-02-17598 и 02-02-06545).

## Список литературы

- [1] Евдокимов А.В., Мушурудли М.Н., Ржанов А.Е. и др. // Зарубежная электронная техника. 1988. Т. 2(231). С. 12–39.
- [2] Puths P.F., Ashok S., Fovath S. et al. // IEEE Trans. Electr. Dev. 1981. Vol. 3D-28. N 9. P. 1003–1009.
- [3] Bagnoli P.E., Navvini A. // Sol. St. Electron. 1987. Vol. 30. N 10. P. 1005–1012.
- [4] Гаман В.И., Дробот П.И., Дученко М.О. и др. // Поверхность. 1996. № 11. С. 64–73.
- [5] Сажин С.Г., Тихов С.В., Подольский В.В. и др. // Приборы и системы управления. 1997. № 7. С. 44–48.
- [6] Ковалевская Г.Г., Мередов Н.М., Руссу Е.В. и др. // ЖТФ. 1993. Т. 63 (2). С. 185–190.
- [7] Nie H.Y., Nannichi Y. // Jap. J. Appl. Phys. 1991. Vol. 30. N 5. P. 906–913.
- [8] Тихов С.В., Лесников В.П., Подольский В.В. и др. // ЖТФ. 1995. Т. 65 (11). С. 120–125.
- [9] Гаман В.И., Дученко М.О., Калыгина В.М. // Изв. вузов. Физика. 1998. № 1. С. 69–83.
- [10] Тихов С.В., Бедный Б.И., Карпович И.А. и др. // Микроэлектроника. 1981. Т. 10 (3). С. 250–254.
- [11] Красильникова Л.М., Ивонин И.В., Якубеня М.П. и др. // Изв. вузов. Физика. 1989. № 3. С. 60–67.
- [12] Родерик Э.Х. // Контакты металл-полупроводник. М., 1982. 206 с.
- [13] Karpovich I.A., Baidus N.V., Zvonkov B.N. et al. // Nanotechnology. 2001. Vol. 12. P. 425–429.
- [14] Карпович И.А., Тихов С.В., Шоболов Е.Л. и др. // ФТП. 2002. Т. 36 (5). С. 582–586.
- [15] Kumar V., Dahlke W.E. // Sol. St. Electron. 1977. Vol. 20. P. 143–152.
- [16] Тихов С.В., Мартынов В.В., Карпович И.А. и др. // Электронная техника. Сер. 2. 1982. Т. 6 (157). С. 18–24.
- [17] Одынец Л.Л., Орлов В.М. // Анодные окисные пленки. Л., 1990. 200 с.