

06;12

## Водородочувствительная структура на полуизолирующем арсениде галлия

© И.А. Карпович, С.В. Тихов, Е.Л. Шоболов, Б.Н. Звонков

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

Поступило в Редакцию 16 ноября 2001 г.

Исследованы сенсорные характеристики простой, чувствительной к водороду структуры на основе полуизолирующего GaAs с планарными Pd электродами, расположенными на окисленной поверхности. Показано, что такие структуры обладают высоким быстродействием. Чувствительность структур к водороду может быть увеличена нанесением на полуизолятор эпитаксиального слоя GaAs с встроенными напряженными квантово-размерными слоями InGaAs и InAs.

Газовые сенсоры на водород обычно изготавливаются на основе структур металл/диэлектрик/полупроводник (МДП-структур) (конденсаторов, полевых транзисторов или диодов Шоттки) на Si или GaAs с каталитически активным Pd электродом [1]. Такие устройства достаточно сложны в изготовлении и требуют дополнительного устройства для подогрева, так как приемлемые сенсорные характеристики достигаются при 80–100°C. В настоящей работе описана простая водородочувствительная структура на основе полуизолирующего GaAs с двумя планарно расположенными на малом расстоянии друг от друга Pd токовыми электродами. В микроэлектронном исполнении один или оба токовых электродов гребенчатой формы могут быть использованы как резистивные нагреватели.

В статье приведены результаты исследования характеристик такой структуры, как газового сенсора, на водород.

Структуры изготавливались на монокристаллических подложках полуизолирующего (*s*-) GaAs. Перед нанесением Pd подложка нагревалась на воздухе при 300°C в течение 30 min для создания слоя термического оксида толщиной  $\approx 3$  nm. Два квадратных Pd электрода размером  $1 \times 1$  mm с зазором между ними  $\approx 30 \mu\text{m}$  наносились на окисленную поверхность *s*-GaAs методом термического испарения в

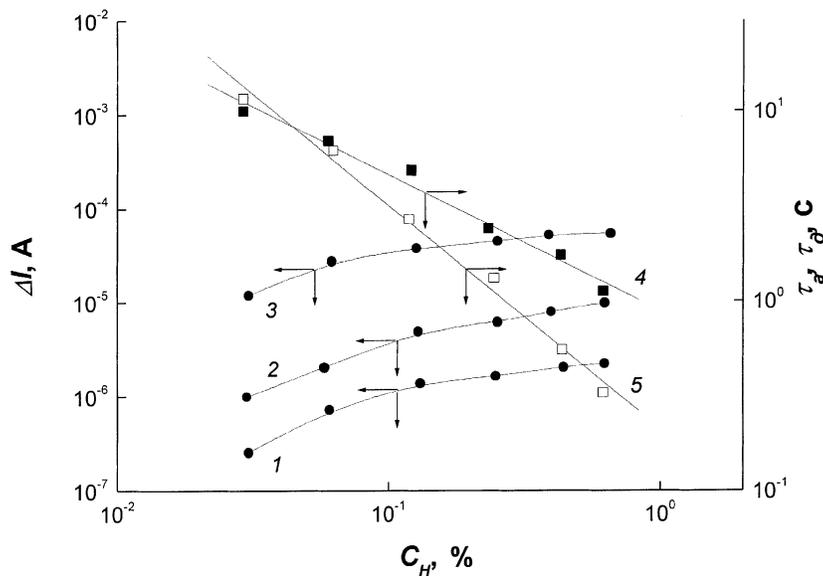
вакууме. Толщина полупрозрачного Pd электрода  $\approx 20$  nm. У части структур на полуизолирующую подложку наносился эпитаксиальный слой нелегированного GaAs толщиной  $\sim 0.5 \mu\text{m}$ , в приповерхностную область которого встраивались три квантовые ямы (КЯ) или слой квантовых точек (КТ) [2]. Методика получения структур с КЯ и КТ описана в [3,4].

Влияние водорода на электрические и фотоэлектрические характеристики структур изучалось при обдувании их потоком воздушно-аргоновой смеси с концентрацией водорода  $C_H$  до 0.6 об.% [5]. Измерения проводились при температуре  $100^\circ\text{C}$ , которая, как было установлено, является оптимальной для получения наилучших сенсорных характеристик.

Полученные структуры представляли собой два включенных навстречу друг другу диода Шоттки с общей базой полуизолирующего материала в зазоре между ними. Как показали измерения, при достаточно узком зазоре между Pd электродами сопротивлением базовой области при  $100^\circ\text{C}$  можно пренебречь. Вольт-амперная характеристика таких структур симметрична и типична для обратносмещенного диода Шоттки на GaAs. До напряжения  $V \approx 1$  V ток  $I \sim V$ , при больших напряжениях  $I \sim \sqrt{V}$ , при напряжении около 10 V начиналось резкое нарастание обратного тока, которое обычно связывается с лавинным пробоем.

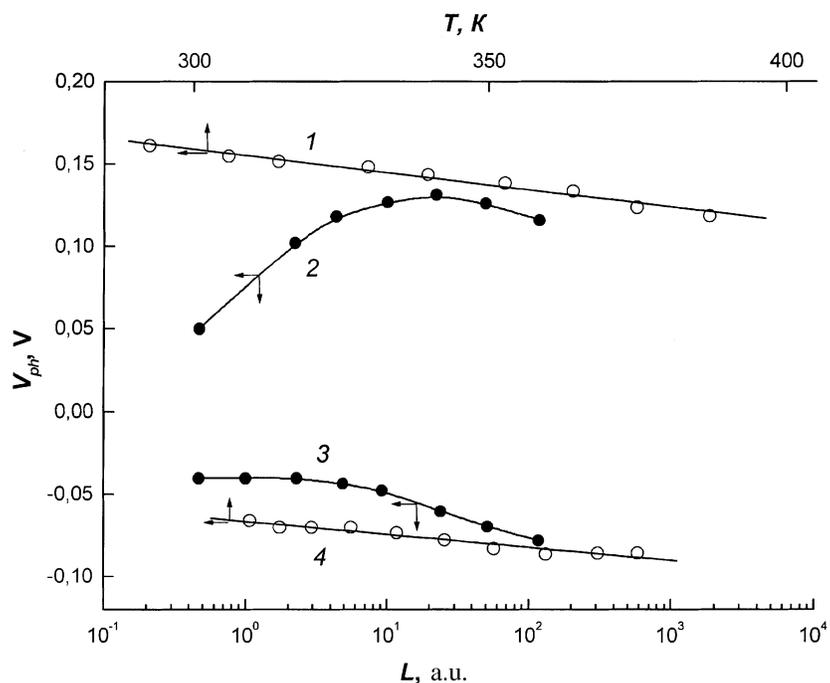
В атмосфере, содержащей водород, наблюдалось увеличение тока через структуру. Величина приращения тока  $\Delta I$ , характеризующая чувствительность структур к водороду, изменялась пропорционально  $C_H$  при малых концентрациях водорода, стремилась к насыщению при больших  $C_H$  (рис. 1, кривые  $I-3$ ) и линейно росла с ростом напряжения вплоть до напряжений, близких к напряжению пробоя, а затем резко уменьшалась. После такого спада происходило необратимое увеличение тока через структуру и уменьшение чувствительности к водороду. При напряжениях  $< 10$  V необратимых изменений не наблюдалось. Наибольшее относительное изменение тока  $\Delta I/I$  в конце участка вольт-амперной характеристики  $I \sim \sqrt{V}$  при  $C_H = 0.6\%$  достигало порядка величины.

Как и в обычных диодных структурах, механизм водородной чувствительности исследованных структур связан с каталитическим действием Pd [1], так как водородная чувствительность не наблюдалась в структурах с электродами из олова и в структурах с неокисленным *s*-GaAs.



**Рис. 1.** Зависимости изменения тока (1–3) и времени его релаксации (4, 5) при воздействии водорода от концентрации водорода: 1, 4, 5 — для структуры на *s*-GaAs, 2 — для структуры с квантовыми ямами, 3 — для структуры с квантовыми точками, 4 —  $\tau_d$ , 5 —  $\tau_a$ .

Структуры с нелегированной эпитаксиальной пленкой GaAs имели такую же чувствительность к водороду, как и структуры на *s*-GaAs. В структурах с КЯ и КТ чувствительность к водороду была значительно выше, чем без них (более чем на порядок в структурах с КТ). Во столько же раз наблюдалось улучшение обнаружительного порога (до  $10^{-3}$  об.%) в структурах с КЯ и КТ. Это может быть объяснено задержкой диффузии водорода в объем GaAs напряженными квантово-размерными слоями, которые создают для мигрирующих атомов водорода дополнительный потенциальный барьер [3], а также обнаруженным уменьшением высоты барьера Pd/GaAs при встраивании в приповерхностную область GaAs КЯ и КТ.



**Рис. 2.** Зависимости фотоэда от интенсивности освещения (2, 3) и от температуры (1, 4): 1, 2 — на воздухе, 3, 4 — в атмосфере, содержащей водород.

Несмотря на худший обнаружительный порог по сравнению с диодами Шоттки на проводящем GaAs ( $\approx 10^{-4}$  об.%) [5], он вполне достаточен для применения в сигнализаторах взрывоопасной концентрации водорода в окружающей среде ( $\sim 4\%$ ) и в течеискателях. Для этих применений детекторов водорода весьма существенными являются требования к их быстродействию. В этом отношении исследованные структуры отвечают достаточно высоким требованиям. Поскольку кинетика релаксации тока при импульсном воздействии водорода не была экспоненциальной, для характеристики быстродействия были выбраны времена нарастания ( $\tau_a$ ) и спада ( $\tau_d$ ) тока до уровня 0.5 от стационарного значения, характеризующие скорости адсорбции и

десорбции водорода соответственно. Зависимость этих времен от  $C_H$  показана на рис. 1 (кривые 4, 5). Из рисунка видно, что они лежат в пределах от 10 до 0.1 с и уменьшаются с ростом  $C_H$ , причем  $\tau_a \sim C_H^{-1}$ , а  $\tau_d \sim C_H^{-1/2}$ .

Для выяснения механизма действия водорода измерялась фотоэдс  $V_{ph}$  между освещенным Pd электродом и расположенным с обратной стороны подложки омическим контактом (Sn). На рис. 2 показаны зависимости  $V_{ph}$  от интенсивности освещения  $L$  и температуры.

При освещении структуры на воздухе (кривая 2) знак фотоэдс  $V_{ph} > 0$  соответствует диффузионно-барьерному механизму возникновения фотоэдс при изгибе зон вверх на барьере Pd/s-GaAs. Однако значение фотоэдс было в 2–3 раза меньше, чем при освещении контактов Pd/n-GaAs на проводящих слоях ( $n \sim 10^{16} \text{ cm}^{-3}$ ), и уже при относительно небольших интенсивностях фотоэдс начинала уменьшаться с ростом интенсивности (кривая 2), что может быть связано с захватом электронов на поверхностные ловушки [6].

В атмосфере, содержащей водород, при концентрации  $C_H = 0.6\%$  происходила смена знака фотоэдс (кривая 3). Этот результат естественно объяснить положительным зарядением границы раздела оксид/s-GaAs в результате хемосорбции на ней атомарного водорода [7]. В отличие от фотоэдс структур на воздухе, которая в соответствии с теорией линейно уменьшалась с ростом температуры (кривая 1), отрицательная фотоэдс структур в водородной атмосфере, наоборот, возрастала с увеличением температуры (кривая 4), что, по-видимому, обусловлено ростом каталитического действия Pd [1].

Таким образом, на полуизолирующем GaAs могут быть сформированы простые, достаточно эффективные и быстродействующие водородочувствительные структуры, которые могут быть использованы для целей течеискания и сигнализации. Полуизолирующая полупроводниковая подложка позволяет использовать электроды в качестве резистивных нагревателей. Установлен механизм воздействия водорода, связанный с возрастанием положительного заряда на поверхности GaAs. Показано, что чувствительность структур к водороду можно существенно повысить встраиванием в высокоомный GaAs квантово-размерных слоев InGaAs и InAs.

Работа выполнялась при финансовой поддержке РФФИ (грант 00–02–17598) и программы „Университеты России“ (проект 015.06.01.37).

## Список литературы

- [1] *Евдокимов А.В., Мушурудли М.Н., Ржанов А.Е.* и др. // Зарубежная электронная техника. 1988. В. 2 (321). С. 3–39.
- [2] *Леденцов Н.Н., Устинов В.М., Шукин В.А.* и др. // ФТП. 1998. Т. 32. В. 4. С. 385–410.
- [3] *Карпович И.А., Анион А.В., Филатов Д.О.* // ФТП. 1998. Т. 32. В. 9. С. 1089–1095.
- [4] *Звонков Б.Н., Карпович И.А., Байдусь Н.В.* и др. // ФТП. 2001. Т. 35. В. 1. С. 92–97.
- [5] *Тихов С.В., Лесников В.П., Подольский В.В.* и др. // ЖТФ. 1995. Т. 65. В. 11. С. 120–125.
- [6] *Зуев В.А., Саченко А.В., Толыго И.Б.* // Неравновесные приповерхностные процессы в полупроводниках и в полупроводниковых приборах. М.: Сов. радио, 1977. 256 с.
- [7] *Гаман В.И., Дученко М.О., Калыгина В.М.* // Известия вузов. Физика. 1998. В. 1. С. 69–83.