

Электрические свойства структур Pd-оксид-InP

© Е.А. Гребенщикова[†], В.В. Евстропов, Н.Д. Ильинская, Ю.С. Мельников*, О.Ю. Серебренникова, В.Г. Сидоров*, В.В. Шерстнёв, Ю.П. Яковлев

Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе Российской академии наук,
194021 Санкт-Петербург, Россия

* Санкт-Петербургский государственный политехнический университет,
195251 Санкт-Петербург, Россия

(Получена 18 августа 2014 г. Принята к печати 25 августа 2014 г.)

С целью создания датчика водорода, способного эффективно работать при комнатной температуре, изготовлены МОП структуры Pd-анодный оксид-InP. Изучены механизмы проводимости структур при 100–300 К. Установлено, что оксид ведет себя как омическое сопротивление, а выпрямляющие свойства структур определяются потенциальным барьером на границе оксид-InP с термотуннельным механизмом проводимости. Структуры существенно изменяют свои характеристики в присутствии водорода в окружающей среде.

1. Введение

Водородная энергетика наряду с гелиоэнергетикой в ближайшем будущем может стать одной из основных отраслей по выработке электроэнергии. В связи с этим наблюдается все возрастающий интерес к данной тематике среди ученых всего мира. Но, несмотря на то что эта отрасль существует уже порядка трех десятилетий, она так и не стала по-настоящему массовой. Связано это прежде всего с серьезными трудностями по хранению и транспортировке взрывоопасного газа. Наряду с созданием водородных топливных элементов развиваются работы по созданию приборов для регистрации утечек водорода из этих элементов, а также из контейнеров при его транспортировке и хранении. Особое внимание уделяется надежному определению взрывоопасной концентрации водорода в воздухе (~ 4.7%). В идеальном случае датчики водорода должны удовлетворять следующим требованиям: возможность работы при комнатной температуре, высокие избирательность и чувствительность к присутствию водорода, высокое быстродействие, низкие энергопотребление и стоимость, простота в изготовлении и эксплуатации, миниатюрность.

К настоящему времени имеются многочисленные сообщения о разработках водородных датчиков на основе полевых транзисторов и МДП структур с диэлектриками из оксидов металлов и SiO₂, а также датчиков, в основе работы которых лежат электрохимические явления [1,2]. Основным недостатком большинства известных датчиков водорода является необходимость нагрева чувствительного элемента до 200–800°C, что создает повышенную взрывоопасность в водородной среде. К их недостаткам также можно отнести низкое быстродействие, высокую стоимость, большие размеры и вес.

Отдельную группу составляют приборы с чувствительным слоем из палладия. К ним относятся полевые транзисторы, МДП структуры и структуры с барьером Шоттки, в которых взаимодействие водорода с палладием приводит к изменению электрических или

фотоэлектрических свойств данных структур [3]. Основные преимущества таких приборов: возможность работы при комнатной температуре, избирательная чувствительность к водороду и малое энергопотребление. На данный момент датчики водорода с чувствительным слоем из палладия производятся рядом компаний мира. Сведения о разработке и производстве таких приборов в России отсутствуют.

Данная статья открывает цикл работ, посвященных созданию и исследованию фотоэлектрического датчика водорода на основе диодов Шоттки с палладиевым контактом к полупроводникам типа A^{III}B^V. В статье рассмотрены электрические свойства структур металл–оксид–полупроводник (МОП) для структуры „Pd-анодный оксид-InP“.

2. Эксперимент

В качестве подложки использовался *n*-InP с концентрацией электронов от 10¹⁶ до 10¹⁸ см⁻³. Перед нанесением палладия подложка обрабатывалась в травителе для удаления поверхностных загрязнений и окислялась с помощью анодного оксидирования. Толщина оксида составляла ~ 1000 Å. Палладий осаждался вакуумным испарением, толщина слоев палладия варьировалась в пределах 90–800 Å. Омический контакт к Pd слою создавался напылением Au, в качестве тыльного омического контакта к *n*-InP использовался сплав Au + Ge. Схематическое изображение исследованных структур приведено на рис. 1.

На рис. 2 для типичной структуры представлены вольт-амперные характеристики (ВАХ) в диапазоне температур 120–270 К (положительный потенциал приложен к палладию), эквивалентная схема и температурная зависимость сопротивления структуры при отсутствии на ней напряжения.

Для всех исследованных структур ВАХ имеют диодный вид с коэффициентами выпрямления 8–10. На эквивалентной схеме структуры (см. вставку на рис. 2) R_{Pd} , R_s , R_D , R_{InP} — сопротивления слоев палладия,

[†] E-mail: eagriropt7@mail.ioffe.ru

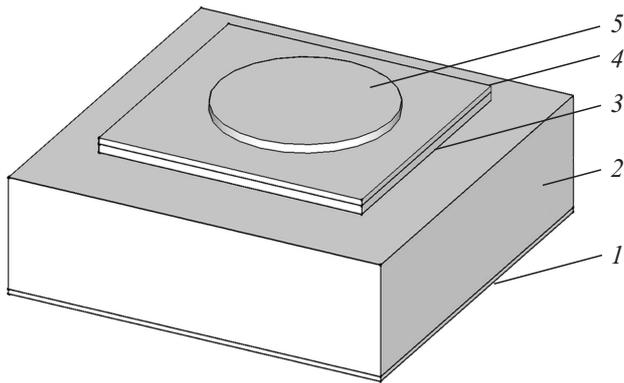


Рис. 1. Общий вид исследуемых образцов (размеры 1.2×1.4 мм). 1 — контакт (Ge + Au)/Au; 2 — подложка n-InP, толщина 350 нм; 3 — оксид, толщина ~ 1000 Å; 4 — палладий, размеры 1×1 мм; 5 — омический Au контакт.

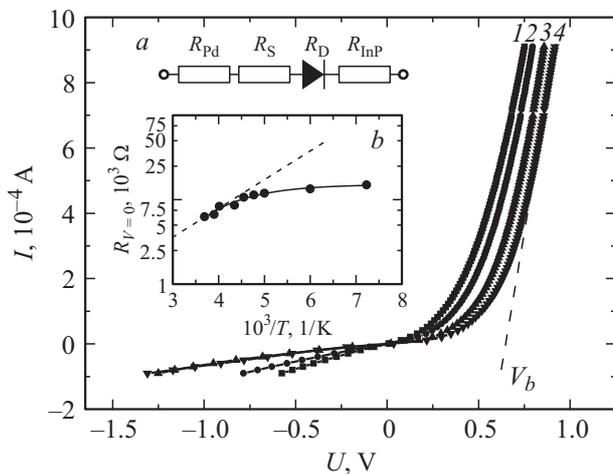


Рис. 2. ВАХ для типичной структуры Pd-оксид-InP. T, K : 1 — 268, 2 — 230, 3 — 176, 4 — 121. На вставках — а) эквивалентная схема структуры; б) температурная зависимость сопротивления структуры при отсутствии на ней напряжения.

анодного оксида, идеального барьера и подложки n-InP соответственно. Поскольку сопротивления R_{Pd} и R_{InP} составляют менее 1% от сопротивления всей структуры, при анализе их можно не учитывать. Дифференциальное сопротивление структуры при отсутствии на ней напряжения $R_{V=0} = R_S + R_D$ (см. вставку на рис. 2) уменьшается с увеличением температуры от 15 до 6.5 кОм, причем при $T < 200$ К слабо изменяется с температурой, а при $T > 200$ К уменьшается экспоненциально с энергией активации ~ 0.35 эВ, которая по величине соответствует потенциальному барьеру, определенному по ВАХ при 270 К. Высота барьера eV_b , определенная путем экстраполяции к $I = 0$ линейной части ВАХ при больших прямых смещениях, с увеличением температуры уменьшается практически линейно от 0.64 до 0.4 эВ. Поскольку при больших прямых смещениях $U > V_b$ сопротивление идеального барьера R_D стремится к

нулю, сопротивление всей структуры в этом случае определяется только сопротивлением анодного оксида R_S , которое в исследованном интервале температур 120–270 К увеличивается от 290 до 340 Ом, т.е. слабо зависит от температуры.

Аппроксимация прямых ветвей ВАХ при смещениях выше 0.4 В, согласно уравнению для ВАХ $j = j_0 [\exp \frac{eU}{\varepsilon} - 1]$, показала, что ток через структуру обладает одновременно и туннельными, и термическими признаками (рис. 3). Такой механизм проводимости называется термополевым или термотуннельным и наблюдался ранее в p-n-структурах полупроводников $A^{III}B^V$ [4,5]. Для данного механизма характеристический параметр ε изменяется с температурой как [4,6].

В нашем случае при низких температурах ($T < 200$ К) $\varepsilon = \text{const}(T) = \varepsilon_0 \approx 0.16$ эВ, что характерно для туннельного тока, при высоких температурах ($T > 200$ К) $\varepsilon = \beta kT$, $\beta \approx 8.5$, что характерно для термического тока (см. вставку на рис. 3). При термотуннель-

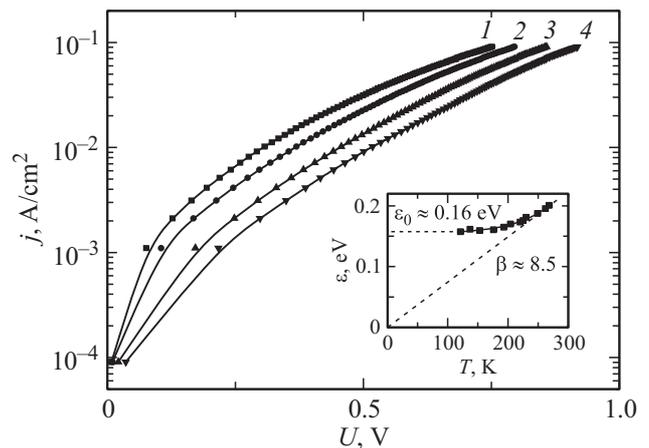


Рис. 3. Прямые ветви ВАХ образца, построенные в полулогарифмическом масштабе. T, K : 1 — 268, 2 — 230, 3 — 176, 4 — 121. На вставке — температурная зависимость параметра ε .

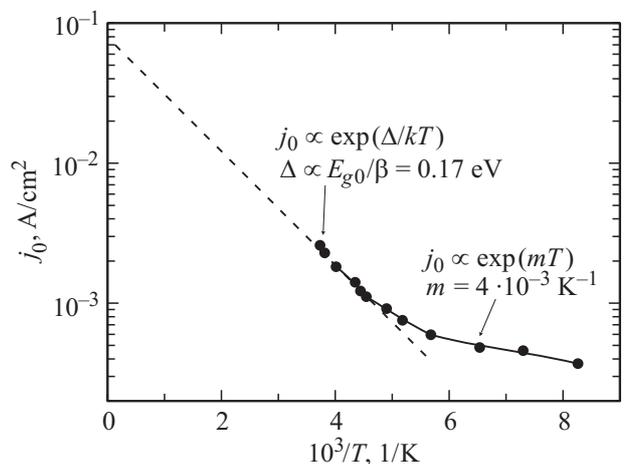


Рис. 4. Температурная зависимость параметра j_0 .

ном механизме для j_0 имеем (рис. 4): при низких температурах $j_0 \propto \exp(mT)$, где $m \approx 4 \cdot 10^{-3} \text{ K}^{-1}$, $m\epsilon_0 = d\epsilon_{g0}/dT \approx 6 \cdot 10^{-4} \text{ эВ/К}$ — температурный коэффициент изменения ширины запрещенной зоны InP; при высоких температурах $j_0 \propto \exp(-\Delta/kT)$, где $\Delta = \epsilon_{g0}/\beta \approx 0.17 \text{ эВ}$, $\epsilon_{g0} \approx 1.43 \text{ эВ}$ — ширина запрещенной зоны InP при $T = 0 \text{ К}$. Температура перехода от туннельного механизма проводимости к термическому приблизительно равна 200 К и может характеризовать степень дефектности слоя объемного заряда (СОЗ), так как концентрация дефектов в СОЗ определяет диапазон температур, где преобладает туннелирование.

3. Заключение

Подводя итоги полученным результатам, можно сказать следующее о механизме проводимости структур „Pd-анодный оксид-p-InP“. Во всем исследованном интервале температур и напряжений анодный оксид ведет себя как омическое сопротивление, а проводимость потенциального барьера, образующегося на границе оксид-p-InP, имеет термотуннельный характер и определяет характер проводимости и ВАХ всей структуры. При этом туннельный механизм проводимости барьера реализуется при температурах ниже 200 К, а при более высоких температурах преобладает термическая проводимость.

Все исследованные структуры существенно изменяли свои характеристики в присутствии водорода в окружающей среде. Установлено, что слой Pd толщиной 200–250 Å дает наилучшие результаты по быстродействию и чувствительности к водороду на InP с концентрацией электронов $10^{16} - 10^{17} \text{ см}^{-3}$, о чем в дальнейшем будет сообщено подробно.

Список литературы

- [1] V.M. Arutyunian. ISJAEЕ, **3** (23), 21 (2005).
- [2] V.M. Arutyunian. ISJAEЕ, **3** (47), 33 (2007).
- [3] Х.М. Салихов Автореф. докт. дис. СПб., ФТИ им. А.Ф. Иоффе РАН (2010).
- [4] М. Шур. Физика полупроводниковых приборов (М., Мир, 1992) кн. 1, гл. 2, с. 209. [Пер. с англ.: M. Shur. Physics of Semiconductor Devices (Prentice-Hall, Inc., 1990)].
- [5] А.Т. Гореленок, В.Г. Груздов, В.В. Евстропов, В.Г. Сидоров, И.С. Тарасов, Л.М. Федоров. ФТП, **18** (6), 1032 (1984).
- [6] А.Я. Шик. ФТП, **17** (7), 1295 (1983).

Редактор Т.А. Полянская

Electrical properties of Pd-oxide-InP structures

Ioffe Physicotechnical Institute
Russian Academy of Sciences,
194021 St. Petersburg, Russia
* St. Petersburg State Polytechnical University,
195251 St. Petersburg, Russia

Abstract Metal-Oxide-Semiconductor (MOS) structures (Pd-oxide-InP) have been fabricated to produce hydrogen sensor which can operate efficiently at room temperature. Carrier transport mechanisms of the structures at 100–300 K have been studied. It is established that oxide behaves just as ohmic resistance and oxide-Pd interface potential barrier causes rectification with thermo-tunnel carrier transport mechanism. Characteristics of the structures change essentially when hydrogen is present in environment.