

УДК 53.096
EDN: VLELMQ

PACS: 51.50.+v

Водородный генератор тока на основе диода Шоттки Pd/InP

© В. А. Шутаев*, Е. А. Гребенщикова, Ю. П. Яковлев

ФТИ им. А. Ф. Иоффе, Санкт-Петербург, 194021 Россия

* E-mail: vadimshutaev@mail.ru

Статья поступила в редакцию 18.09.2025; после доработки 10.10.2025; принята к публикации 20.02.2026

Шифр научной специальности: 1.3.11

Создан новый генератор тока на основе диода Шоттки Pd/InP площадью 1 мм², работающий в атмосфере 100 % водорода в условиях полной темноты. Установлено, что в режиме короткого замыкания «водородный ток» диода Шоттки увеличивается почти на три порядка при увеличении температуры от 90 до 300 К. Показано, что увеличение «водородного тока» с ростом температуры связано с уменьшением высоты потенциального барьера диода в интервале температур 90–300 К. Предложен механизм управления величиной генерации «водородного тока» посредством изменения температуры диода Шоттки Pd/InP.

Ключевые слова: водород, палладий, Pd/InP, ионизация, гидрид палладия.

DOI: 10.51368/1996-0948-2026-1-101-105

Введение

Электрические свойства диодов Шоттки Pd/InP в газовой среде с водородом исследуются с целью создания датчиков водорода [1–5]. При этом изучаются изменения вольт-амперных и емкостных характеристик таких диодов в водороде по сравнению с воздушной средой, причём все измерения, как правило, выполняются при приложении внешнего напряжения. В водороде изменяется работа выхода палладия [6, 7] и, как следствие, изменяется высота потенциального барьера в диодах Pd/InP, изменяются при этом и электрические характеристики диодов, а по изменению характеристик можно судить о концентрации водорода в газовой среде.

Ранее исследовали механизмы токопрохождения [1, 2] в структурах Pd/InP в водородной среде с освещением структуры светодиодом и без него при комнатной температуре без приложения внешнего напряжения. В работе [3] была обнаружена генерация тока в диодах Шоттки Pd/InP при помещении их в

водородную среду без приложения внешнего смещения. Данная работа является продолжением выше названных работ и посвящена исследованию генерации тока и ЭДС в структурах Pd/n-InP в интервале температур 90–300 К в атмосфере водорода.

Эксперимент

Технология изготовления исследуемых структур Pd/InP подробно изложена в работах [1–3]. Слой палладия площадью 1×1 мм² и толщиной 25 нм создавался термическим напылением в вакууме Pd чистотой 99,96 % на монокристаллических пластинах InP с концентрацией электронов 10¹⁶ см⁻³. К палладию и InP были созданы омические контакты на основе золота. Изучены электрические свойства структур Pd/InP в интервале температур 90–300 К в вакууме и в среде водорода. Исследование структур проводилось в условиях коротко замкнутой электрической цепи и в режиме холостого хода. Для оценки температурной зависимости высоты потенциального

барьера в исследуемых диодах Шоттки были измерены вольт-амперные характеристики в условиях полной темноты в вакууме и в среде 100 % водорода.

При исследовании электрических характеристик структур Pd/InP использовался источник-измеритель KEITLEY-6517B (Keithley Instruments, Inc.) с выводом данных на компьютер.

Результаты эксперимента

Рассмотрим поведение тока в атмосфере водорода в интервале температур 90–300 К (рис. 1). «Водородный ток», т. е. ток, который появляется только в среде водорода в режиме короткого замыкания в условиях полной темноты и увеличивается почти на 3 порядка

с увеличением температуры от 90 до 300 К. При $T \sim 270$ К ток достигает максимального значения $10 \text{ }\mu\text{A}$ при площади структуры 1 мм^2 . На зависимости ЭДС (E) от температуры в атмосфере водорода (рис. 2) можно выделить флуктуации в рассматриваемом диапазоне температур, однако прослеживается тенденция к увеличению ЭДС по абсолютному значению при уменьшении температуры. ЭДС достигает максимального значения $|E| = 170 \text{ мкВ}$ при температуре 90 К.

На рисунке 3 приведена зависимость высоты потенциального барьера диода Шоттки Pd/InP от температуры в атмосфере 100 % водорода. Высота потенциального барьера определялась по величине напряжения отсечки вольт-амперной характеристики экстраполяцией к $I = 0$.

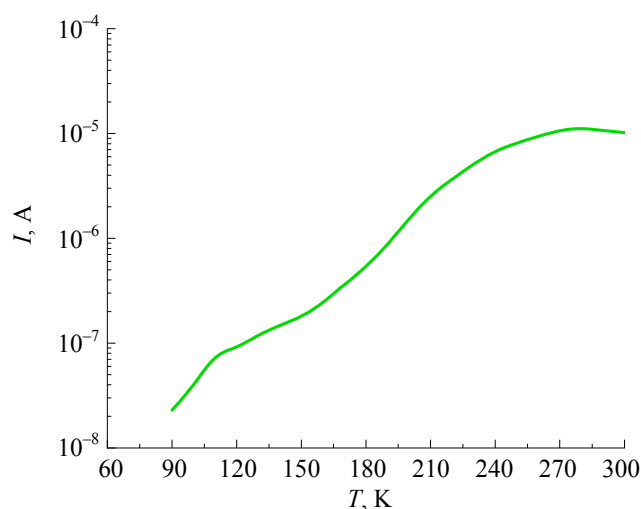


Рис. 1. Температурная зависимость генерации тока в атмосфере водорода

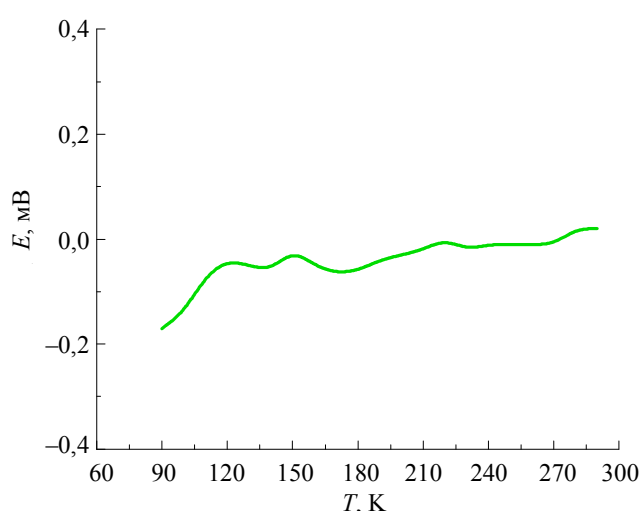


Рис. 2. Температурная зависимость генерации ЭДС в атмосфере водорода

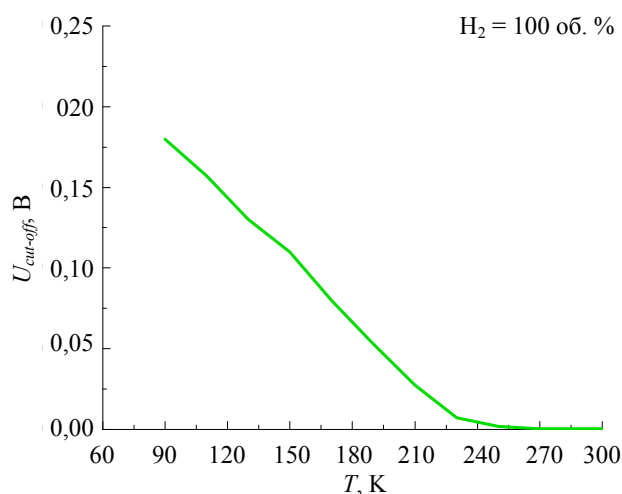


Рис. 3. Температурная зависимость высоты потенциального барьера от температуры

Из представленного графика видно, что высота барьера диода Шоттки в водороде монотонно уменьшается от 0,18 до 0 эВ при увеличении температуры от 90 до 270 К.

Анализ результатов

Появление «водородного тока» в диодах Шоттки Pd/InP в атмосфере водорода может быть связано, по мнению авторов, с образованием дополнительного количества электронов в Pd-слое. Образование дополнительного количества электронов, в свою очередь, может быть следствием двух факторов. Во-первых при контакте водорода с Pd-слоем возможна ионизация атомов водорода. Как было показано в работе [8] при сближении атомов водорода с атомами Pd на расстояние меньше боровского радиуса энергия ионизации атомов водорода может быть уменьшена до 0 эВ. Во-вторых, при взаимодействии Pd-слоя с водородом происходит образование гидроксида палладия PdH_x [9, 10]. Процесс образования PdH_x является экзотермическим и происходит с выделением тепловой энергии [11]. Совокупное воздействие этих двух факторов, возможно, и приводит к появлению дополнительного количества электронов в палладиевом слое.

После образования дополнительных электронов происходит их дрейф из палладиевого слоя в InP. Потенциальный барьер диода Шоттки существенно ограничивает поток электронов, образовавшихся в результате ионизации. В среде водорода (100 об. %) высота барьера в диодах Шоттки Pd/InP линейно уменьшается от 0,18 до 0 эВ при повышении температуры с 90 К до 270 К. При высоте барьера близкой к 0 эВ появляются условия для свободного протекания электронов по электрической цепи. Генерируемый в результате этого эффекта ток максимален при температуре 275–280 К. При дальнейшем повышении температуры до 300 К начинается плавное уменьшение генерируемого «водородного тока». Сопротивление потенциального барьера, определенное по наклону вольт-амперных характеристик при значении напряжения 10 мВ, уменьшается с 10^5 до 1–2 Ом при повышении температуры от 90 до 300 К.

На рис. 4 представлены зонные диаграммы, поясняющие полученный экспери-

ментальный результат. Высота барьера диода Шоттки Pd/InP в вакууме определяется разницей между работой выхода Pd и InP и составляет 0,32 эВ при $T = 90$ К. При взаимодействии палладия с водородом в условиях полной темноты при комнатной температуре происходит ионизация атомов водорода с образованием протонов и электронов, а работа выхода палладия W_{Pd} уменьшается на величину 0,3–0,7 эВ [2, 6].

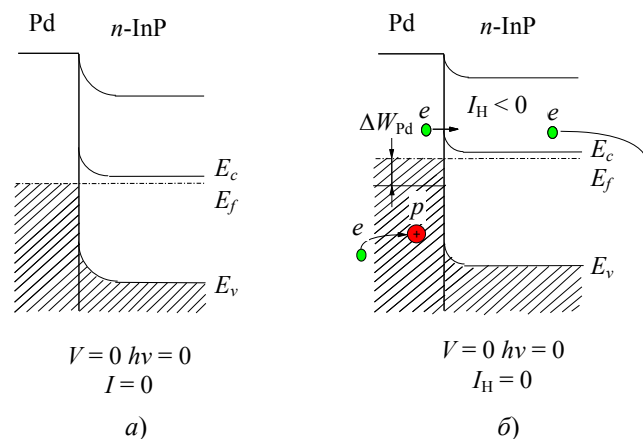


Рис. 4. Зонные диаграммы и токи в структуре Pd/InP, внешнее напряжение на образце равно нулю, электрическая цепь коротко замкнута, $T = 90$ К: а – в вакууме; б – в водороде; I_H – «водородный ток»; ΔW_{Pd} – изменение работы выхода Pd в водороде; e – электроны; p – протоны

Уменьшение W_{Pd} приводит к уменьшению высоты барьера Шоттки. В результате разделения носителей заряда на потенциальном барьере в структуре появляется ток короткого замыкания, величина которого зависит от высоты барьера. При понижении температуры высота барьера увеличивается, а электроны начинают накапливаться около границы раздела Pd/InP. Это приводит к тому, что ток короткого замыкания начинает уменьшаться, а ЭДС холостого хода нарастать. Длительность протекания тока в структуре при $T = 300$ К сохраняется в течение суток, а затем линейно уменьшается в течение 7 суток до 10 % от исходной величины. При повторном напуске водорода в кювету ток увеличивается до такого же значения, как и при первоначальном напуске водорода (10 мкА). Величина генерируемого тока (10 мкА) пропорциональна площади структуры (1 мм^2). Следует отметить, что с увеличением температуры от 90 до 300 К высота барьера в среде водорода будет

уменьшаться и стремиться к 0 эВ за счет уменьшения ширины запрещенной зоны E_g в InP.

Заключение

Исследована генерация тока и ЭДС в диодах Шоттки Pd/InP в вакууме и водородной среде в интервале температур 90–300 К в условиях полной темноты. В среде водорода в диодах Шоттки генерируется ток в интервале температур 90–300 К. Величина генерируемого тока увеличивается почти на три порядка с увеличением температуры от 90 до 300 К. Величина ЭДС увеличивается по абсолютному значению от 0 до 170 мкВ с понижением температуры от 300 до 90 К. Генерация тока может быть обусловлена образованием дополнительных электронов за счет образования гидрида палладия при взаимодействии водорода с Pd-слоем.

Авторы заявляют, что у них нет конфлик-
та интересов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Шутаев В. А., Гребеничкова Е. А., Сидоров В. Г., Яковлев Ю. П. / ФТП. 2021. Т. 55. № 12. С. 1236–1239.
2. Шутаев В. А., Сидоров В. Г., Гребеничкова Е. А., Власов Л. К., Пивоварова А. А., Яковлев Ю. П. / ФТП. 2019. Т. 53. № 10. С. 1427–1430.
3. Шутаев В. А., Гребеничкова Е. А., Сидоров В. Г., Яковлев Ю. П. / ФТП. 2024. Т. 58. № 1. С. 37–41.
4. Chou Y.-I., Chen C.-M., Liu W.-Ch., Chen H.-I. / IEEE Electron Device Lett. 2005. Vol. 26. № 2. P. 62–65.
5. Kumar A. A., Janardhanam V., Reddy V. R. / J Mater Sci: Mater Electron. 2011. № 22. P. 854–861.
6. Yamamoto N., Tonomura S., Matsuoka T., Tsubomura H. / J. Appl. Phys. 1981. Vol. 52. № 10. P. 6227–6230.
7. Skucha K., Fan Zh., Jeon K., Javey A., Boser B. / Sensors Actuators B. 2010. № 145. P. 232–238.
8. Константинов О. В., Дымников В. Д., Мунцев М. А. / ФТП. 2008. Т. 42. № 8. С. 947–949.
9. Ube T., Hasegawa S., Horie T., Ishiguro T. / J. Mater. Sci. 2021. № 56. P. 3336–3345.
10. Ndaya C. C., Javahiraly N., Brioude A. / Sensors. 2019. Vol. 19. № 4478. P. 1–41.
11. Барьюдин Л. Э. / ФТТ. 1995. Т. 37. № 5. С. 1484–1491.

PACS: 51.50.+v

Hydrogen current generator based on Pd/InP Schottky diode

V. A. Shutaev*, E. A. Grebenshchikova, and Yu. P. Yakovlev

Ioffe Institute, Russian Academy of Sciences, St. Petersburg, 194021 Russia

*E-mail: vadimshutaev@mail.ru

Received 18.09.2025; revised 10.10.2025; accepted 20.02.2026

A new current generator based on Pd/InP Schottky diode with an area of 1 mm² operating in hydrogen medium in complete darkness has been created. It is established that in a short-circuit regime a “hydrogen current” of the Schottky diode increases by about three orders of magnitude with increasing the temperature from 90 to 300 K. It is shown that the increase of the “hydrogen current” with increase the temperature is related to the decrease of the potential barrier height of the diode in the temperature range 90–300 K. The mechanism of current generation in Pd/InP Schottky diodes in 100 % hydrogen, consisting in appearance of an additional number of electrons in Pd-layer as a result of palladium hydride formation, is proposed.

Keywords: hydrogen, palladium, Pd/InP, ionization, palladium hydride.

REFERENCES

1. Shutaev V. A., Grebenshchikova E. A., Sidorov V. G., and Yakovlev Yu. P., Semiconductors **56** (14), 2170–2173 (2022).
2. Shutaev V. A., Sidorov V. G., Grebenshchikova E. A., Vlasov L. K., Pivovarov A. A., and Yakovlev Yu. P., Semiconductors **53** (10), 1389–1392 (2019).

3. Shutaev V. A., Sidorov V. G., Grebenshchikova E. A., and Yakovlev Yu. P., Semiconductors **58** (1), 34–37 (2024).
4. Chou Y.-I., Chen C.-M., Liu W.-Ch., and Chen H.-I., IEEE Electron Device Lett. **26** (2), 62–65 (2005).
5. Kumar A. A., Janardhanam V., and Reddy V. R., J. Mater Sci: Mater Electron, № 22, 854–861 (2011).
6. Yamamoto N., Tonomura S., Matsuoka T., and Tsubomura H., J. Appl. Phys. **52** (10), 6227–6230 (1981).
7. Skucha K., Fan Zh., Jeon K., Javey A., and Boser B., Sensors Actuators B, № 145, 232–238 (2010).
8. Konstantinov O. V., Dymnikov V. D., and Mitsev M. A., Semiconductors **42** (8), 931–933 (2008).
9. Ube T., Hasegawa S., Horie T., and Ishiguro T., J. Mater. Sci., № 56, 3336–3345 (2021).
10. Ndaya C. C., Javahiraly N., and Brioude A., Sensors **19** (4478), 1–41 (2019).
11. Bar'yudin L. E., Fiz. Tverd. Tela **37** (5), 1484–1491 (1995) [in Russian].

Об авторах

Шутаев Вадим Аркадьевич, к.ф.-м.н., научный сотрудник, ФТИ им. А. Ф. Иоффе (194021, Россия, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, 26). E-mail: vadimshutaev@mail.ru

Гребенщикова Елена Александровна, к.ф.-м.н., старший научный сотрудник, ФТИ им. А. Ф. Иоффе (194021, Россия, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, 26). Email: lot160@mail.ru AuthorID: 116448

Яковлев Юрий Павлович, д.ф.-м.н., главный научный сотрудник, ФТИ им. А. Ф. Иоффе (194021, Россия, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, 26). E-mail: yakovlev.iropto@mail.ioffe.ru SPIN-код: 3394-1498, AuthorID: 20496