

07

## Каскад неустойчивостей импеданса структуры Pd–поверхностно-окисленный InP

© М.Е. Компан, А.В. Горбатюк, В.Г. Малышкин, В.А. Шутаев, Е.А. Гребенщикова, Ю.П. Яковлев

Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН, Санкт-Петербург, Россия

E-mail: kompan@mail.ioffe.ru

Поступило в Редакцию 30 мая 2022 г.

В окончательной редакции 10 июля 2022 г.

Принято к публикации 11 июля 2022 г.

Обнаружена множественная неустойчивость на вольт-амперной характеристике структуры палладий–поверхностно-окисленный фосфид индия. Эффект зафиксирован при регистрации зависимости дифференциальной проводимости и дифференциальной емкости от приложенного внешнего напряжения. Предложен механизм появления неустойчивостей.

**Ключевые слова:** палладий, вольт-амперная характеристика, неустойчивость, импедансометрия.

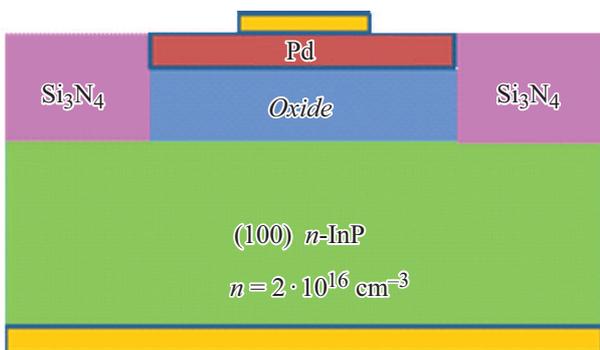
DOI: 10.21883/PJTF.2022.17.53278.19266

Структуры „палладий на фосфиде индия“ перспективны в качестве датчика водорода. Характеристики различных реализаций подобных устройств исследуются во многих работах (см., например, [1–3]). Схематическое сечение структур, исследованных в настоящей работе, показано на рис. 1.

В работе изучались характеристики проводимости подобных структур на переменном токе. Исследования в этой технике известны под названием импедансометрии [4]. Аппаратура, использовавшаяся в настоящей работе (Solartron 1260 и Solartron 1287), предоставляет на выходе данные измерений в виде величины синфазной составляющей ( $Z'$ ) комплексного импеданса и величины составляющей импеданса, сдвинутой на  $90^\circ$  ( $Z''$ ). Эти величины связаны известными формулами с проводимостью и емкостью:

$$Z' = 1/\sigma, \quad Z'' = 1/\omega C. \quad (1)$$

Далее при изложении результатов используются величины  $Z'$  и  $Z''$ , т.е. величины, которые непосредственно выводятся измерительной аппаратурой. Опыты проводились при комнатной температуре.



**Рис. 1.** Сечение исследованных структур Pd–поверхностно-окисленный InP. Омические контакты (Au) показаны без подписи.

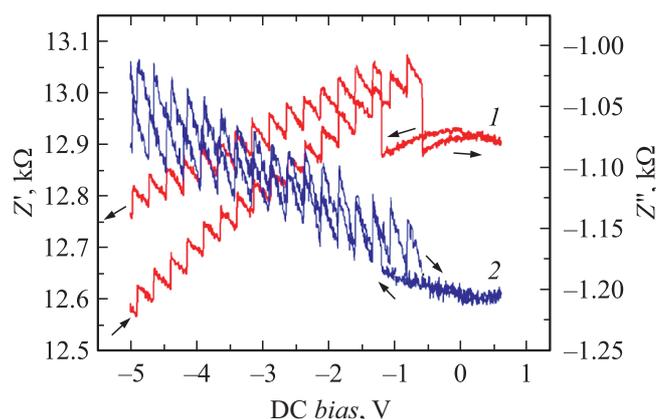
Пример обнаруженных множественных неустойчивостей демонстрируется на рис. 2.

Следует отметить, что указанные особенности наблюдались практически на всех исследованных образцах, однако параметры вольт-амперной характеристики (ВАХ) и особенностей отличались от образца к образцу и могли несколько различаться даже при последовательных сканированиях постоянного напряжения на одном и том же образце. Последнее наблюдение коррелирует с дрейфом кривых ВАХ, регистрируемых при многократном проходе (рис. 3).

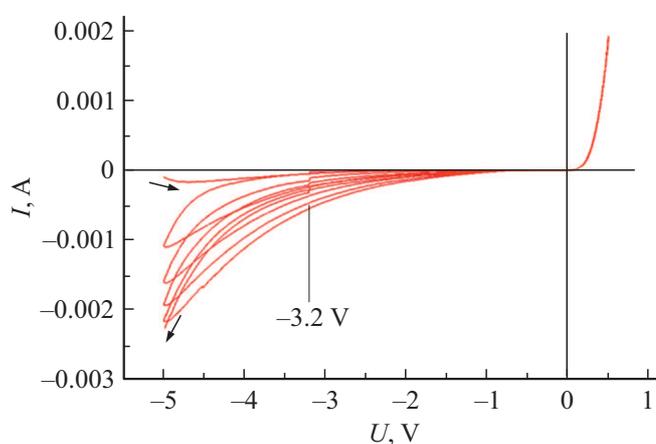
Обнаруженные неустойчивости наблюдаются как резкие скачки импеданса (в том числе и на отдельных составляющих импеданса). Отдельный скачок представляет собой резкое уменьшение дифференциального сопротивления и синхронное с ним увеличение дифференциальной емкости (рис. 2). При дальнейшем (после скачка) увеличении (отрицательного) напряжения на палладиевом электроде  $Z'$  непрерывно возрастает, а  $Z''$  уменьшается до тех пор, пока не произойдет следующий скачок. Период наблюдающихся осцилляций по величине приложенного постоянного напряжения на рис. 2 примерно постоянный и составляет около 0.25 В.

Необходимо отметить, что указанные особенности проявляются в определенном диапазоне напряжений. Из рис. 2 видно, что при возрастании напряжения первый резкий скачок происходит примерно при  $-1.2$  В, а при обратном движении возврат к области непрерывных зависимостей происходит примерно при  $-0.55$  В. Эксперименты при более высоких напряжениях, чем показано на рис. 2 и 3, не проводились из-за риска необратимого пробоя структур. Отметим еще раз, что приведенные значения относятся к конкретным образцам. Опыты на других образцах дали сравнимые величины.

Детальная интерпретация наблюдаемого каскада нестабильностей на данном этапе не представляется возможной, в том числе ввиду недостаточного понима-



**Рис. 2.** Кривые для  $Z'$  (1) и  $Z''$  (2). Измерения проводились на частоте 100 кГц. Знак напряжения на оси абсцисс соответствует знаку напряжения на палладии.



**Рис. 3.** Семейство вольт-амперных характеристик образца Pd–поверхностно-окисленный InP. Многократное сканирование. Каскад неустойчивостей на рисунке неразличим, он виден лишь при переменноточковой регистрации.

ния структуры исследуемого объекта. Трудность представляет и то, что наблюдающееся явление включает несколько эффектов разной природы. Необходимо объяснить, во-первых, первый резкий скачок — переход от непрерывной зависимости в область существования неустойчивостей, а во-вторых (и это, на наш взгляд, наиболее интересно), существование нескольких последовательных проявлений неустойчивостей. Также наблюдается заметный дрейф ВАХ. Отметим сразу, что скачки импеданса, по нашему мнению, с большой вероятностью есть проявление некоего электрического пробоя, но при этом указанный пробой, как видно, не препятствует дальнейшему повышению напряжения на образце.

Формальное объяснение такого поведения напряжения находится, если предположить, что структура образца подобна схеме из двух последовательных конденсаторов, один из которых испытывает обратимый пробой при превышении определенного уровня напряжения. В этом

случае при пробое один из конденсаторов разряжается, и его заряд стекает на другой конденсатор. Накопленный на втором конденсаторе заряд сохраняется и даже несколько увеличивается за счет дополнительного заряда. Дальнейшее увеличение внешнего напряжения по законам электростатики распределяется между двумя конденсаторами обратно пропорционально их емкостям. Тем самым напряжение на первом „слабом“ конденсаторе начинает расти от нуля и снова может достигнуть величины напряжения пробоя. В такой схеме суммарное напряжение на образце (из двух конденсаторов) не становится нулевым при пробое, как это можно было бы ожидать.

На основании имеющихся данных нельзя уверенно указать, что именно может формировать две емкости. В известных публикациях о природе контакта Pd–InP имеются указания на возможность существования на границе этих материалов промежуточных фаз [5,6]. Возможно, необходимые емкости формируются на границах слоя окисла или на границах промежуточных фаз.

Природа пробоя также пока остается неясной. Для резкого протекания пробоя необходим нелинейный элемент, который обеспечит положительную обратную связь по току. Скорее всего, в данном случае следует исключить обычный тепловой пробой. Такой процесс действительно приводит к увеличению проводимости и резкому возрастанию тока, но в этом случае процесс, скорее всего, будет необратим.

Известно, что роль нелинейного эффекта может играть шнурование тока или другие подобные явления. Такие эффекты известны в мощных полупроводниковых приборах (см., например, [7]), но в нашем случае этот механизм представляется маловероятным, так как токи через структуру слишком малы и тем более малы осцилляции тока при наблюдавшихся неустойчивостях.

Помимо уже упомянутого теплового пробоя положительную обратную связь при пробое и в то же время повторяемость процесса может обеспечить туннельный пробой барьера на границе палладия и изолятора в том случае, если разность энергий протуннелировавшего электрона и дна зоны проводимости полупроводника больше ширины запрещенной зоны полупроводника. В этом случае электрон, релаксирующий на дно зоны, может родить электронно-дырочную пару (оже-процесс). Электроны под действием приложенного внешнего поля внесут вклад в ток и уйдут в положительный электрод. Дырки, поскольку их масса существенно больше электронных масс, не могут эффективно туннелировать сквозь барьер и собираются у границы полупроводника с окисным слоем. Поскольку заряд дырок положительный, они будут усиливать действие внешнего поля и тем самым послужат фактором положительной обратной связи, ускоряющим пробой „слабого“ конденсатора.

Показанный на рис. 3 дрейф ВАХ, по-видимому, непосредственно не связан с эффектом каскада неустойчивостей. Во всяком случае представляется, что дрейф не

является причиной наблюдающегося каскада особенностей. Возможны разные причины этого дрейфа. Назовем в качестве возможной причины образование заряженных центров в изолирующем слое. Другой возможный вариант — разложение паров воды на палладиевом электроде под напряжением и внедрение водорода в палладий [8]. Конкретный механизм дрейфа ВАХ не является предметом настоящей работы. Однако на возможную связь этих двух эффектов необходимо указать как на одну из вероятных причин некоторой невоспроизводимости параметров каскада неустойчивостей.

Отдельно отметим, что аналогичное по наименованию явление („каскад неустойчивостей“) относительно недавно обнаружено и исследуется на объектах другой природы — при сложных течениях жидкостей [9]. Публикации о подобных явлениях в твердых телах авторам неизвестны.

Таким образом, в работе сообщается о наблюдении нового явления — каскада неустойчивостей в структуре палладий–поверхностно-окисленный фосфид индия. Предложена модель, объясняющая возможность существования серии последовательных особенностей импедансных характеристик в слоистой структуре.

## Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

## Список литературы

- [1] T. Hübert, L. Boon-Brett, G. Black, U. Banach, *Sensors Actuators B*, **157** (2), 329 (2011). DOI: 10.1016/j.snb.2011.04.070
- [2] В.А. Шутаев, Е.А. Гребенщикова, В.Г. Сидоров, М.Е. Компан, Ю.П. Яковлев, *ФТП*, **54** (6), 547 (2020). DOI: 10.21883/FTP/2020.06.49383.9359 [V.A. Shutaev, E.A. Grebenschikova, V.G. Sidorov, M.E. Kompan, Yu.P. Yakovlev, *Semiconductors*, **54** (6), 658 (2020). DOI: 10.1134/S1063782620060160].
- [3] O. Cemohorski, K. Zdansky, J. Zaval, P. Kacerovsky, K. Piksova, *Nanoscale Res. Lett.*, **6** (1), 410 (2011). DOI: 10.1186/1556-276x-6-410
- [4] E. Barsukov, J.R. Macdonald, *Impedance spectroscopy: theory, experiment, applications* (Wiley, Hoboken, N.J., 2018).
- [5] E.Yu. Zakharova, S.M. Kazakov, A. Götze, H. Kohlmann, A.N. Kuznetsov, *J. Solid State Chem.*, **265**, 266 (2018). DOI: 10.1016/j.jssc.2018.06.012
- [6] D.G. Ivey, *Platinum Met. Rev.*, **43** (1), 2 (1999).
- [7] А.В. Горбатюк, *Письма в ЖТФ*, **32** (23), 1 (2006). [A.V. Gorbatyuk, *Tech. Phys. Lett.*, **32** (12), 999 (2006). DOI: 10.1134/S1063785006120017].
- [8] S. Sarkar, S.C. Peter, *Inorg. Chem. Front.*, **5** (9), 2060 (2018). DOI: 10.1039/C8QI00042E
- [9] R. McKeown, R. Ostilla-Mónico, A. Pumir, M. Brenner, S.M. Rubinstein, *Sci. Adv.*, **6** (9) (2020). DOI: 10.1126/sciadv.aaz2717