ПРИБОРЫ И ТЕХНИКА ЭКСПЕРИМЕНТА, 2022, № 2, с. 118–121

## \_\_\_\_\_ ОБЩАЯ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ \_\_\_\_\_ ТЕХНИКА

УДК 620.173.251.1

## УСОВЕРШЕНСТВОВАННАЯ УНИВЕРСАЛЬНАЯ УСТАНОВКА ГИДРОСТАТИЧЕСКОГО ДАВЛЕНИЯ С ПНЕВМОУСИЛИТЕЛЕМ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ И ТЕРМИЧЕСКИХ ЭФФЕКТОВ В ПОЛУПРОВОДНИКАХ ПРИ ВОЗДЕЙСТВИИ ВСЕСТОРОННЕГО ГИДРОСТАТИЧЕСКОГО ДАВЛЕНИЯ

## © 2022 г. Р. Хамидов<sup>*a*,\*</sup>, О. Маматкаримов<sup>*b*</sup>

<sup>а</sup> Алмалыкский филиал российского Национального исследовательского технологического университета "МИСиС" Узбекистан, 110105, Алмалык Ташкентской обл., ул. Амира Темура, 56 <sup>b</sup> Наманганский инженерно-технологический институт Узбекистан, 160115, Наманган, ул. Касансай, 7 \*e-mail: r\_khamidov@mail.ru Поступила в редакцию 30.08.2021 г. После доработки 04.10.2021 г. Принята к публикации 05.10.2021 г.

Описана модернизация универсальной установки гидростатического давления с пневмоусилителем с двумя гидрокамерами, предназначенной для исследования статических и динамических тензосвойств полупроводников с глубокими примесными центрами. Установка позволяет проводить импульсное воздействие гидростатического давления на исследуемый образец в двух режимах: тензотерморежиме, когда воздействие импульсного давления приводит к увеличению температуры образца, и изотермическом режиме, когда воздействие давления осуществляется без изменения температуры. Показано, что второй режим обеспечивает возможность наблюдения релаксационных эффектов в полупроводниках с глубокими уровнями при импульсном давлении. Предлагаемая установка позволяет проводить исследования в обоих режимах гидрокамеры в диапазоне давлений 0-2 ГПа и температуры 273–500 К. Максимальная скорость нарастания давления в тензотерморежиме гидрокамеры  $dP/dt = 2 \cdot 10^8$  Па/с; в изотермическом режиме гидрокамеры давление распространяется практически мгновенно.

DOI: 10.31857/S0032816222010177

В настоящее время изучение электрофизических свойств полупроводников под действием внешних механических воздействий является весьма актуальной задачей. Как известно, внешние механические воздействия делятся на изотропные (всесторонние) и анизотропные (одноосное и локальное) давления. Электрофизические свойства полупроводников при анизотропном давлении очень хорошо изучены [1–4].

Обзор литературы показал, что изучению электрофизических свойств полупроводников при изотропном (гидростатическом) сжатии посвящено много работ. Но практически во всех работах исследованы остаточные эффекты, которые наблюдаются в полупроводниковых образцах после выдержки их при высоких гидростатических давлениях [5–7].

В нашей лаборатории была разработана установка гидростатического давления [8, 9] для исследования электрофизических свойств полупроводников и структур на их основе при всестороннем гидростатическом давлении. Эта установка позволяет исследовать тензоэлектрические свойства полупроводников и структур на их основе в статическом и динамическом режимах воздействия гидростатического давления с амплитудой 0-5 ГПа. Однако при многолетнем использовании установки обнаружились некоторые ее недостатки. В частности, при динамическом режиме воздействия давления температуры жидкости и исследуемого образца в камере гидростатического давления возрастают на 7-10°С. Это приводит к появлению дополнительной проводимости исследуемых полупроводников [10]. В работе [10] мы показали, что при динамическом режиме воздействия гидростатического давления на полупроводник с глубокими примесными уровнями наблюдается, помимо температурного эффекта, еще и релаксационный эффект. Установка [8] не позволяет проводить исследования тензоэлектрических свойств полупроводников в динамиче-



Рис. 1. Установка гидростатического давления с пневмоусилителем. 1 – манометр; 2 – пневмокамеры; 3 – верхние диски; 4 – мембраны; 5 – резиновые прокладки; 6 – подвижный шток; 7 – верхняя гидрокамера; 8 – поршень; 9 – комплект из резиновых, свинцовых и медных прокладок; 10 – верхний гидроканал; 11 – клапан; 12 – термостат; 13 – нижняя гидрокамера; 14 – гайка для закрепления держателя; 15 – подложка; 16 – электромагнит; 17 – нижний гидроканал; 18 – исследуемый образец; 19 – держатель; 20 – электрические выводы; 21 – фиксирующая гайка.

ском режиме без изменения температуры образцов. При воздействии гидростатического давления в динамическом режиме без изменения температуры можно наблюдать релаксационные эффекты, связанные только с колебательными процессами кристаллической решетки полупроводника.

В настоящей работе представлены результаты модернизации установки гидростатического давления с пневмоусилителем [8, 9], предназначенной для исследования электрофизических и тензотермоэлектрических свойств полупроводников и структур на их основе. На рис. 1 приведена предлагаемая нами конструкция установки.

Установка содержит камеру гидростатического давления, состоящую из двух частей 7, 13, и пневматический усилитель. Последний состоит из трех пневмокамер 2. Верхние диски 3 каждой пневмокамеры жестко скреплены с корпусом пневмоусилителя и уплотнены резиновыми прокладками 5. Давление в пневмокамерах 2 измеряется с помощью манометра 1. Мембраны 4 жестко прикреплены к подвижному штоку и приводят его в движение при нагнетании воздуха в пневмокамеры. Давление из пневмокамер передается в гидроканал 10 через подвижный шток 6 и поршень 8 гидроканала. При закрытом клапане 11 из пневмоусилителя давление передается только в первую часть гидроканала 10. При этом во второй части 17 гидроканала давление не меняется. Далее, при открытии клапана 11 давление из первой части гидроканала мгновенно распространяется без изменения температуры в его вторую часть. При открытом положении клапана 11 давление через шток передается в обе части гидроканала. Поршень 8 и держатель 19 уплотнены комплектом из резиновых, свинцовых и медных прокладок 9. Исследуемый образец 18 с электрическими выводами и специальным защитным покрытием установлен на держателе 19, который прикреплен к гидрокамере с помощью специальной гайки 14. Электрические выводы 20 из держателя выводятся наружу через подложки 15. Термостат 12 обеспечивает проведение экспериментов при разных температурах. В установке также предусмотрены электромагниты 16 для изучения гальваномагнитных явлений в исследуемых образцах. При необходимости можно фиксировать поршень 8 гайкой 21. При этом давление в гидрокамере сохраняется, даже если выпустить воздух из пневмокамеры.

В отличие от предыдущей версии установки, в предлагаемой конструкции камера гидростатического давления состоит из двух частей, которые соединены через клапан 11. Такая конструкция гидрокамеры обеспечивает возможность проведения экспериментов в двух режимах динамического воздействия гидростатического давления. При открытом клапане 11, когда обе части гидрокамеры являются единым целым, имеет место так называемый тензотерморежим. В этом режиме температура образца возрастает при воздействии импульсного давления, т.е. установка работает как ее предыдущая версия. Второй режим называется изотермическим режимом. В этом режиме в первой части 7 гидрокамеры предварительно создается высокое гидростатическое давление с помощью пневмоусилителя. Далее, при постоянной температуре открывается клапан, и давление из первой части гидрокамеры мгновенно распространяется во вторую часть, где установлен исследуемый образец. В этом режиме объем жидкости почти не меняется, и температура образца остается постоянной. Все эффекты, которые наблюдаются в изотермическом режиме, являются эффектами нетермического происхождения.

В старой версии установки радиус канала гидравлической камеры мал (всего 0.5 см). Такой узкий канал не позволяет установить на держателе



**Рис. 2.** Изменение температуры исследуемого образца *n*-Si<P, Ni> с удельным сопротивлением  $\rho = 1.1 \cdot 10^5$  Ом · см в режимах работы гидрокамеры: **a** – тензотерморежиме, **б** – изотермическом режиме.

дополнительные элементы для контроля электрофизических и термоэлектрических процессов, происходящих в исследуемых образцах. Поэтому мы увеличили радиус гидроканала до  $R_p = 0.8$  см. Однако увеличение радиуса гидроканала приводит к уменьшению коэффициента усиления пневмоусилителя [8, 9]:

$$P_P = kP_m,\tag{1}$$

где  $P_p$  – давление в рабочей камере;  $P_m$  – давление в пневмокамерах; k – коэффициент усиления, определяемый как:

$$k = N \left(\frac{R_m}{R_p}\right)^2.$$
 (2)

В старой версии установки  $k = 3.2 \cdot 10^3$  ( $R_m = 20$  см,  $R_p = 0.5$  см, N = 2). Чтобы коэффициент усиления не уменьшился, мы увеличили радиус мембраны в пневмокамере до  $R_m = 28$  см и число пневмокамер до N = 3. При таких параметрах коэффициент усиления k нашей конструкции составил  $3.67 \cdot 10^3$ . При давлении в пневмокамерах, равном  $P_m = 6 \cdot 10^5$  Па, в рабочей камере давление будет  $P_p = 2.2$  ГПа.

На рис. 2 приведены зависимости давления и температуры от времени (временная шкала работы предлагаемой установки) при амплитудном значении приложенного гидростатического давления. Согласно рис. 2а (правая и верхняя шкалы), в тензотерморежиме температура образцов увеличивается на 8 К при достижении амплитуды давления  $6 \cdot 10^8$  Па и скорости нарастания давления  $2 \cdot 10^8$  Па/с. В изотермическом режиме гидрокамеры температура исследуемого образца остается постоянной (рис. 26, правая и верхняя шкалы), несмотря на мгновенное нарастание давления до амплитудного значения (рис. 26, левая и нижняя шкалы). Также, согласно рис. 2, импульс давления в изотермическом режиме почти прямоугольный, в отличие от импульса тензотермора.

Технические возможности предлагаемой установки позволяют проводить исследования в обоих режимах гидрокамеры в диапазоне давлений 0-2 ГПа и температуры 273—500 К. Максимальная скорость нарастания давления в тензотерморежиме гидрокамеры составляет  $dP/dt = 2 \cdot 10^8$  Па/с. При такой скорости время нарастания давления до амплитудного значения 6 · 10<sup>8</sup> Па составляет 3 с. В изотермическом режиме гидрокамеры давление распространяется практически мгновенно.

На рис. З приведено относительное изменение тока, проходящего через образец *n*-Si<P, Ni> с удельным сопротивлением  $\rho = 1.1 \cdot 10^5$  Ом · см, в разных режимах работы гидрокамеры.

В обоих случаях амплитуда импульсного давления равна  $6 \cdot 10^8$  Па. При тензотерморежиме относительное значение тока возрастает в 2.2 раза (рис. 3, кривая *I*), а в изотермическом режиме — всего в 1.45 раза (рис. 3, кривая *2*). При изотермическом режиме импульсного давления отсутствуют эффекты, связанные с возрастанием темпера-



**Рис. 3.** Временные зависимости отношения тока, проходящего через исследуемый образец *n*-Si<P, Ni> с удельным сопротивлением  $\rho = 1.1 \cdot 10^5$  Ом · см, к начальному значению тока при импульсном гидростатическом давлении в режимах работы гидрокамеры: *1* – тензотерморежиме, *2* – изотермическом режиме.

туры. Кривая 2 на рис. З явно показывает, что в образцах *n*-Si<P, Ni> с удельным сопротивлением  $\rho = 1.1 \cdot 10^5$  Ом · см наблюдаются эффекты, связанные только с колебательными процессами, стимулированными импульсным давлением.

Таким образом, можно сделать вывод о том, что новая конструкция установки гидростатического давления позволяет исследовать динамический тензоэффект в полупроводниках с глубокими примесными уровнями в двух режимах гидрокамеры. В изотермическом режиме работы гидрокамеры впервые удалось наблюдать колебательно-релаксационные эффекты, происходящие в образцах кремния с примесями никеля. Помимо этого, расширение гидроканала позволило установить около исследуемого образца элементы для контроля электрических, тензотермических и гальваномагнитных явлений. Новая конструкция гидроканала открывает дополнительные возможности в исследовании динамических тензоэффектов в полупроводниковых образцах с глубокими примесными уровнями.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Chenyang Zhao, Qun Wei, Meiguang Zhang, Haiyan Yan, Xinchao Yang, Yingjiao Zhou, Bing Wei, Jianli Ma // Zeitschrift für Naturforschung A. 2018. V. 73. № 7. P. 661. https://doi.org/10.1515/zna-2017-0469
- Francaviglia L., Giunto A., Kim W., Romero-Gomez P., Vukajlovic-Plestina J., Friedl F., Potts H., Güniat L., Tütüncüoglu G., Fontcuberta i Morral A. // Nano Letters. 2018. V. 18. № 4. P. 2393.

https://doi.org/10.1021/acs.nanolett.7b05402

- Sun Y., Thompson S.E., Nishida T. // Journal of Applied Physics. 2007. V. 101. P. 104503. https://doi.org/10.1063/1.2730561
- Hinsche N.F., Mertig I., Zahn P. // J. Phys. Condens. Matter. 2011. V. 23 (29). P. 295502. https://doi.org/10.1088/0953-8984/23/29/295502
- 5. *Newitt D.* // Nature. 1964. V. 203. P. 223. https://doi.org/10.1038/203223b0
- 6. Даунов М.И., Камилов И.К., Габибов С.Ф. // Физика твердого тела. 2004. Т. 46. Вып. 10. С. 1766.
- 7. *Eremets M.I.* High Pressure Experimental Methods. Oxford University Press, 1996. ISBN 0198562691, 9780198562696
- Abduraimov A., Zajnabidinov S.Z., Mamatkarimov O.O., Khimmatkulov O., Khudajbergenov T.E. // Instruments and Experimental Techniques. 1992. V. 35. № 5. P. 229.
- 9. Abduraimov A., Zajnabidinov S.Z., Mamatkarimov O.O., Khimmatkulov O., Khudajbergenov T.E. // Instruments and Experimental Techniques. 1988. V. 31. № 5 P. 229.
- Khamidov R., Mamatkarimov O. // Semicond. Sci. Technol. 2021. V. 36. № 6. P. 065008. https://doi.org/10.1088/1361-6641/abf29e