

## ФАЗОВЫЕ ПОРТРЕТЫ ДЕФОРМАЦИОННЫХ ЭФФЕКТОВ В ПОЛУПРОВОДНИКАХ В ИМПУЛЬСНОМ РЕЖИМЕ

М.Г. Дадамирзаев<sup>1,2</sup>, А.Г. Гулямов<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Наманганский инженерно-педагогический институт  
Узбекистан

<sup>2</sup>Физико-технический институт Академии наук РУз (Ташкент)  
Узбекистан

Поступила в редакцию 03.10.2012

Исследовано токи в компенсированном  $p$ -Si<Ni> под воздействием прямоугольного импульса гидростатического давления. Процесс возникновения и установления анализировался методом фазовых траекторий. Показано, что фазовые траектории могут быть рассмотрены как термодинамический круговой процесс. Эти термодинамические циклы деформационных эффектов в полупроводниках удобно изображать на фазовых портретах, которые образованы из совокупности разных изопроцессов.

**Ключевые слова:** тензорезистивный эффект, фазовый портрет, релаксация сопротивления, тензочувствительность в импульсном режиме.

Досліджено струми в компенсованому  $p$ -Si<Ni> під впливом прямокутного імпульсу гідростатичного тиску. Процес виникнення та встановлення аналізувався методом фазових траєкторій. Показано, що фазові траєкторії можуть бути розглянуті як термодинамічний круговий процес. Ці термодинамічні цикли деформаційних ефектів у напівпровідниках зручно зображувати на фазових портретах, які створені із сукупності різних ізопроцесів.

**Ключові слова:** тензорезистивний ефект, фазовий портрет, релаксація опору, тензочутливість в імпульсному режимі.

Investigated currents in compensated  $p$ -Si <Ni> exposed rectangular pulse of hydrostatic pressure. The process of establishing and studied by the method of phase trajectories. It is shown that the phase trajectories can be considered as a thermodynamic cyclic process. These thermodynamic cycles of deformation effects in semiconductors is convenient to represent the phase portrait that education of the totality of izoprotsessov.

**Keywords:** thin-film effect, the phase portrait, relaxation resistance tensorsensitivity in pulsed mode.

### ВВЕДЕНИЕ

Исследовано влияние деформации на сопротивление кремния с глубокими уровнями в импульсном режиме, показано, что тензочувствительность в динамическом режиме больше чем в статическом режиме [1 – 3].

В работе [4] теоретически исследовано влияние переменной деформации на неравновесную концентрацию электронов с помощью метода фазовых траекторий. Показано, что метод фазовых траекторий дает дополнительную информацию об электронных процессах и структурных изменениях в полупроводнике.

Целью настоящей работы является исследование фазовых портретов тензорезистивного эффекта в образцах кремния с глубокими уровнями.

### ФАЗОВЫЕ ПОРТРЕТЫ РЕЛАКСАЦИИ СОПРОТИВЛЕНИЯ В ИМПУЛЬСНОМ РЕЖИМЕ

Проанализируем влияния переменной деформации на сопротивление образцов кремния, легированных примесями с глубокими уровнями [1 – 3]. В работе [3] исследовано влияние импульса гидростатического давления (ВГД), при температуре 293 К, на токи через образец  $p$ -Si<Ni> при приложении постоянного напряжения. Скорость изменения давления на фронте прямоугольного импульса составляет  $dP/dt = 10^8$  Па/с (рис. 1).

Процесс изменения тока состоит из двух этапов - быстрого этапа роста тока от  $J_0$  до  $J_{max}$  обусловленного резким увеличением давления от  $P_0$  до  $P$  и медленного – постепенным уменьшением тока от  $J_{max}$  до  $J_{st}$  при постоянном давлении  $P$ . Далее, после медленного

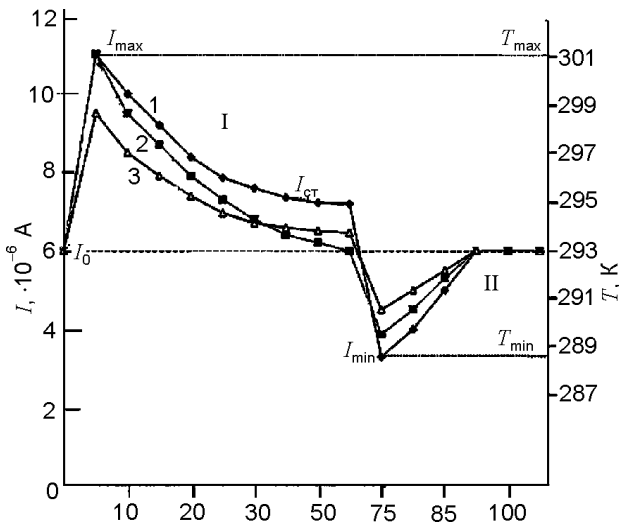


Рис. 1. Зависимости тока от времени  $I = f(t)$  в сильно компенсированных образцах  $p\text{-Si}\langle\text{Ni}\rangle$  при воздействии импульса (I) и после снятия (II) всестороннего давления со скоростью  $dP/dt = 10^8$  Па/с при  $T = 273$  К. 1 –  $P = 5 \cdot 10^8$  Па, 2 –  $P = 2,5 \cdot 10^8$  Па, 3 – изменение температуры при  $P = 5 \cdot 10^8$  Па [3].

этапа ток остается постоянным до тех пор пока давление резко не падает до своего первоначального значения. При резком снятии напряжения деформации значение тока резко падает от  $J_{st}$  до  $J_{min}$  – это второй быстрый этап, в дальнейшем, последует второй медленный этап – ток медленно растет до своего первоначального значения  $J_0$ .

Используя временную зависимость тока  $J$  и давления  $P$  от времени  $t$  получим фазовый портрет процесса изменения тока в плоскости давление-ток. Когда скорости нарастания и падения давления, приложенного к образцу, достаточно малы, быстрые этапы установления тока можно считать изотермическими, а медленные этапы изобарическими.

В этом случае круговой процесс состоит из двух изобар и из двух изотерм. Критерием малости скорости нарастания давления является то, что время нарастания импульса  $t(0)$  должно быть больше времени тепловой релаксации образца  $\tau_m$  ( $\tau_p < \tau_m$ ).

На рис. 2 приведены фазовые портреты процесса возникновения и релаксации избыточного тока на образце  $p\text{-Si}\langle\text{Ni}\rangle$  на фазовой плоскости ток-давление ( $J\text{-}P$ ) при приложении прямоугольного импульса давления. Пользуясь экспериментальными данными рис. 1 можно построить фазовый портрет процесса тензорезистивного эффекта в фазовой плос-

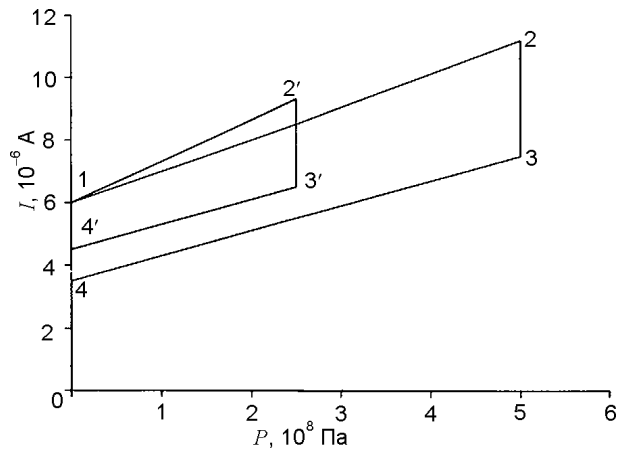


Рис. 2. Фазовый портрет кругового процесса изменения тока на фазовой плоскости ток-давление в сильно компенсированных образцах  $p\text{-Si}\langle\text{Ni}\rangle$  при воздействии импульса и после снятия всестороннего давления со скоростью  $dP/dt = 10^8$  Па/с при  $T = 293$  К. Амплитуда импульса давления 1234 –  $P = 5 \cdot 10^8$  Па, 12'3'4' –  $P = 2,5 \cdot 10^8$  Па.

кости сопротивление-давление  $R\text{-}P$  (рис. 3). На рис. 3 круговой цикл состоит из двух адиабат (отрезки 1 – 2 и 3 – 4 на рис. 3) и из двух изобар (отрезки 2 – 3, 4 – 1 на рис. 3).

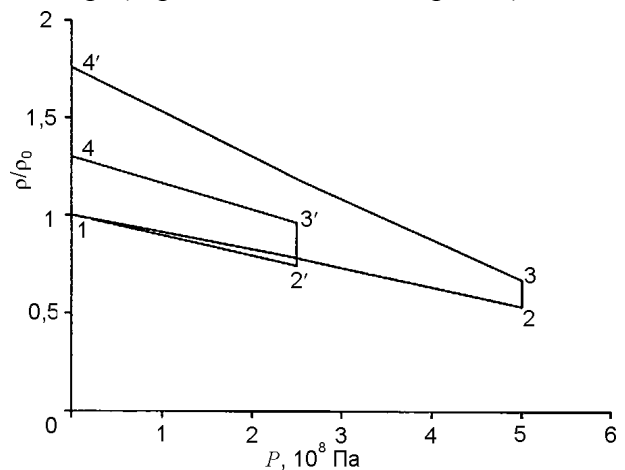


Рис. 3. Фазовый портрет кругового процесса изменения сопротивления  $R$  на фазовой плоскости сопротивление-давление  $R\text{-}P$  в сильно компенсированных образцах  $p\text{-Si}\langle\text{Ni}\rangle$  при воздействии импульса всестороннего давления со скоростью  $dP/dt = 10^8$  Па/с при  $T = 293$  К. Длительность импульса давления 60 с. Амплитуда импульса давления 1234 –  $P = 5 \cdot 10^8$  Па, 12'3'4' –  $P = 2,5 \cdot 10^8$  Па.

Когда скорости нарастания и падения давления достаточно большие, быстрые этапы установления тока можно считать адиабатическими, а медленные этапы изобарическими. В этом случае можно предположить, что круговой процесс состоит из двух адиабат (отрезки 1 – 2 и 3 – 4 на рис. 2) и из двух изобар (отрезки 2 – 3, 4 – 1 на рис. 2).

Сравним результаты экспериментов с теоретическими исследованиями. В работе [4] приведены фазовые портреты процесса изменения концентрации собственных носителей зарядов при приложении переменной деформации на фазовой плоскости деформация-концентрация. В этой работе показано, что фазовые портреты изотермического процесса воздействия деформации на концентрацию неравновесных носителей зарядов имеют прямоугольную форму.

Однако, из рис. 2 и рис. 3 видно, что экспериментальный фазовый портрет процесса воздействия деформации на изменение тока в сильно компенсированных образцах  $p$ -Si<Ni> имеет некоторое отклонение от прямоугольной формы. На опыте получается не прямоугольник, а некоторая, своего рода трапеция. Чем же можно объяснить такое отклонение эксперимента от теории? По-видимому, это отклонение можно объяснить следующим образом. При теоретическом рассмотрении [4] изменение концентрации носителей зарядов пренебрегалось изменением температур, считая его постоянным. В эксперименте [3] при воздействии импульса давления, как видно из рис. 1, температура не постоянна, и изменяется в диапазоне от 289 до 301 градусов по шкале Кельвина. Это изменение вызывает дополнительную термогенерацию носителей, и, приводит к уменьшению или увеличению сопротивления образца на различных этапах процесса. Результатом этих изменений и является отклонение фазовых портретов от прямоугольной формы.

В общем случае процесс возникновения и установления дополнительного тока при воздействии переменной деформации можно рассмотреть как термодинамический круговой процесс [5]. Эти термодинамические циклические процессы деформационных эффектов в полупроводниках удобно изображать на фазовых плоскостях ток-давление  $j$ - $P$ , ток деформация  $j$ - $\epsilon$ , температура-давление  $T$ - $P$ , температура-деформация  $T$ - $\epsilon$ , сопротивление-давление  $R$ - $P$ , сопротивление-деформация  $R$ - $\epsilon$ , которые могут быть рассмотрены как замкнутые кривые, образованные из совокупности разных изопроцессов.

На рис. 4 изображено фазовый портрет релаксационного процесса изменения температуры при воздействии импульса давления на фазовой плоскости температура-давление  $T$ - $P$ . Здесь (1 - 2), (3 - 4) – отрезки адиабатического процесса, (2 - 3), (4 - 1) – отрезки изобарического процесса. Цикл состоит из двух адиабат и двух изобар. Отрезки (1 - 2), (3 - 4) – изображают быстрые этапы, а (2 - 3), (4 - 1) – медленные этапы.

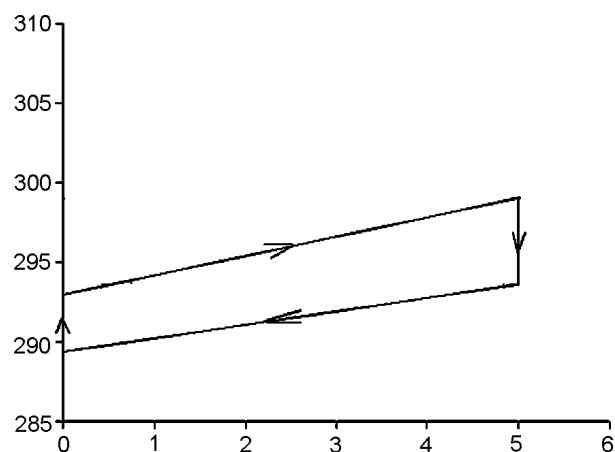


Рис. 4. Фазовый портрет тензорезистивного изменения температуры с давлением.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Исследование деформационных эффектов методом фазовых портретов дают наиболее полную информацию о колебательном процессе, и позволяет одним взглядом увидеть весь физический процесс. Все основные преимущества использования метода фазовых портретов должны обнаружиться также при анализе влияния переменной деформации на физические свойства различных полупроводниковых материалов.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Зайнабидинов С.З., Маматкаримов О.О., Абдураимов А. Динамические тензохарактеристики диодов с барьером Шоттки при импульсном гидростатическом давлении//ФТП. – 2000. – Т. 34, Вып. 1. – С. 67-70.
2. Зайнабидинов С.З., Маматкаримов О.О. Влияние внешних воздействий на поведение примеси золота в кремнии//ФТП. – 2000. – Т. 34, Вып. 6. – С. 641-644.
3. Маматкаримов О.О., Хамидов Р.Х. Тензорезистивный эффект в кремнии//Письма в ЖТФ. – 2003. – Вып. 3. – С. 24-28.

4. Ahmetoglu M., Shamirzaev S.H., Gulyamov G., Dadamirzayev M., Gulyamov A.G. Change in the resistance of the semiconductor in the variable deformation field//Rom. Journ. Phys. – 2007. – Vol. 52, No. 3-4. – P. 319-327.
5. Базаров И.П. Термодинамика. - М.: Высшая школа, 1991. – 378 с.
2. Zajnabidinov S.Z., Mamatkarimov O.O. Vliyanie vneshnih vozdeystvij na povedenie primesi zolota v kremnii//FTP. – 2000. – Т. 34, Вып. 6. – S. 641-644.
3. Mamatkarimov O.O., Hamidov R.H. Tenzorezistivnyj effekt v kremnii//Pisma v ZhTF. – 2003. – Вып. 3. – S. 24-28.
4. Ahmetoglu M., Shamirzaev S.H., Gulyamov G., Dadamirzayev M., Gulyamov A.G. Change in the resistance of the semiconductor in the variable deformation field//Rom. Journ. Phys. – 2007. – Vol. 52, No. 3-4. – P. 319-327.
5. Bazarov I.P. Termodinamika. – М.: Vysshaya shkola, 1991. – 378 s.

#### LITERATURA

1. Zajnabidinov S.Z., Mamatkarimov O.O., Abduraimov A. Dinamicheskie tenzoharakteristiki diodov s barerom Shottki pri impulsnom gidrostaticheskom davlenii//FTP. – 2000. – Т. 34, Вып. 1. – S. 67-70.