

## РЕЛАКСАЦИОННЫЕ ИЗМЕНЕНИЯ ПОДВИЖНОСТИ И КОНЦЕНТРАЦИИ НОСИТЕЛЕЙ ЗАРЯДА В Si С ГЛУБОКИМИ ПРИМЕСНЫМИ УРОВНЯМИ ПРИ ВОЗДЕЙСТВИИ ИМПУЛЬСНОГО ДАВЛЕНИЯ

О.О. Маматкаримов, Р.Х. Хамидов, Р.Г. Жабборов, У.А. Туйчиев, Б.Х. Кучкаров

*Наманганский инженерно-технологический институт*

*Узбекистан*

Поступила в редакцию 29.09.2012

В работе исследовано изменение концентрации и подвижности носителей заряда в образцах *n*- и *p*-типа кремния с примесью никеля при воздействии импульсного гидростатического давления и при изменении температуры с помощью электрического нагревателя встроенного в исследуемый образец. Показано, что динамический тензоэффект этих образцов связан 50% от температуры и 50% от колебательных эффектов кристаллической решетки образцов кремния с примесью никеля.

**Ключевые слова:** тензосвойства, компенсированный кремний, концентрация носителей, подвижность носителей, импульсное давление, гидростатическое давление, примеси никеля, динамический тензоэффект, глубокие уровни.

У роботі досліджена зміна концентрації та рухливості носіїв заряду в зразках *n*- і *p*-типу кремнію з домішкою нікелю при впливі імпульсного гідростатичного тиску й при зміні температури за допомогою електричного нагрівача вбудованого в досліджуваний зразок. Показано, що динамічний тензоэффект цих зразків зв'язаний 50% від температури й 50% від коливальних ефектів кристалічної решітки зразків кремнію з домішкою нікелю.

**Ключові слова:** тензовластивості, компенсований кремній, концентрація носіїв, рухливість носіїв, імпульсний тиск, гідростатичний тиск, домішки нікелю, динамічний тензоэффект, глибокі рівні.

In this article have been investigated changes in the concentration and mobility of charge carriers in the samples of *n* and *p* type of nickel doped silicon under pulse hydrostatic pressure and with change of temperature by electrical heater integrated to the samples. Has been shown, that the dynamic strain effect of these samples due to 50% of the temperature and 50% of the vibration effects of the crystal lattice of nickel doped silicon.

**Keywords:** strain properties, compensated silicon, concentration of charge carriers, mobility of charge carriers, pulse pressure, hydrostatic pressure, impurity of nickel, dynamic strain effects, deep levels.

Известно [1, 2] что полупроводники с глубокими уровнями имеет большую чувствительность к внешним воздействиям. Один из таких воздействий является влияние внешнего давления. Особенно при импульсном гидростатическом давлении в полупроводниках с глубокими примесными уровнями наблюдается интересные эффекты. Эти эффекты до сих пор объяснялись в основном влиянием температуры стимулированной импульсным давлением [3].

В работе [3] показано, что при амплитуде  $\Delta P = 5 \cdot 10^8$  Па импульсного давления со скоростью нарастания

$\frac{\partial P}{\partial t} = 2 \cdot 10^8$  Па/с температура образца увеличивается на 7 – 10 °С.

Авторы также показали что, при такой амплитуде и скорости импульсного давления изменение электрофизических параметров образцов с глубокими уровнями становится существенным. Если образцы нагревается на 7 – 10 °С с помощью электрического нагревателя, изменений электрических параметров в такой степени не наблюдается. Следовательно, можно предположить, что при резких изменениях внешнего давления, кроме изменений температуры образца, проявляется и релаксационные эффекты. Авторами [4] были изучены некоторые из этих релаксационных эффектов. Показано, что релаксационные эффекты приводят к существенному изменению электрических параметров образцов. В связи с этим в настоящей работе рассматривается вклад релаксационных эффектов в общие тензосвойства кремния компен-

литуде и скорости импульсного давления изменение электрофизических параметров образцов с глубокими уровнями становится существенным. Если образцы нагревается на 7 – 10 °С с помощью электрического нагревателя, изменений электрических параметров в такой степени не наблюдается. Следовательно, можно предположить, что при резких изменениях внешнего давления, кроме изменений температуры образца, проявляется и релаксационные эффекты. Авторами [4] были изучены некоторые из этих релаксационных эффектов. Показано, что релаксационные эффекты приводят к существенному изменению электрических параметров образцов. В связи с этим в настоящей работе рассматривается вклад релаксационных эффектов в общие тензосвойства кремния компен-

сированного примесями, создающими глубокие энергетические уровни.

Известно, [3] что в компенсированных образцах кремния изменение подвижности носителей заряда, при статическом давлении, незначительно. При этом в компенсированных образцах кремния *n*-типа подвижность носителей заряда увеличивается, а в образцах *p*-типа – уменьшается.

В данной работе приводятся результаты анализа тензо-Холл эффекта наблюдаемого в образцах Si с глубокими примесными уровнями. Для проведения экспериментов нами изготовлены образцы кремния с примесями Ni, Mn и Au с различными удельными сопротивлениями и типами проводимости. Эксперименты проводились на установке всестороннего гидростатического давления (ВГД) с пневмоусилителем, описанной в [5].

Известно, что при приложении импульсного давления изменяется температура образца, следовательно, при увеличении температуры, может изменяться и подвижность носителей заряда.

Исследования показали, что при воздействии импульсного давления в образцах *n*-Si <Ni> подвижность носителей заряда увеличивается, достигает своего максимального значения и далее уменьшается.

При снятии давления значение подвижности уменьшается, становится меньше первоначального значения, но с течением времени возвращается к первоначальному значению. Ход изменения подвижности при воздействии импульсного гидростатического давления (ИГД) качественно похож на ход изменения тока при ИГД, но по значению абсолютной величины меньше (рис. 1).

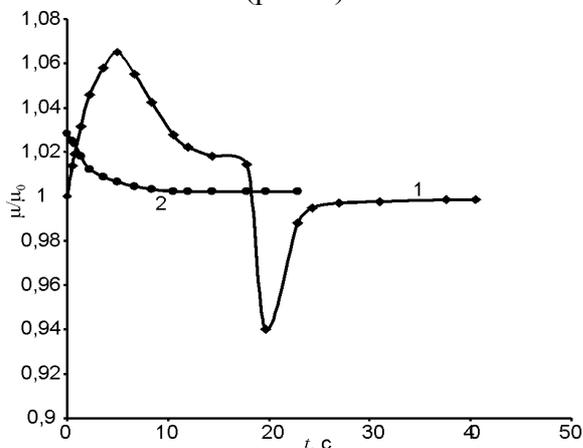


Рис. 1. Относительное изменение подвижности носителей заряда в образцах *n*-Si<Ni> при ИГД (1) и при изменении температуры с помощью нагревателя (2).

Известно [6], что при ИГД изменяется температура образца. Можно предполагать, что изменение подвижности, носителей заряда при ИГД, связано с изменением температуры, стимулированным импульсным давлением.

Но, как видно из рис. 1 при увеличении температуры на 10 °С с помощью обычного нагревателя подвижность уменьшается незначительно.

Это говорит о том, что при ИГД увеличение подвижности носителей заряда в образцах *n*-Si<Ni> связано с релаксационными эффектами, а увеличение температуры образца при ИГД снижает увеличение подвижности носителей заряда при ИГД за счет релаксационного эффекта.

На рис. 2 приведено относительное изменение подвижности носителей заряда в *p*-Si<Ni> с удельным сопротивлением  $\rho \sim 10^3$  Ом·см.

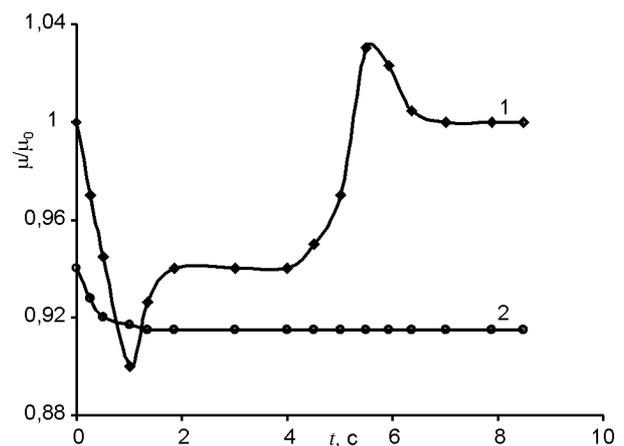


Рис. 2. Относительное изменение подвижности носителей заряда в *p*-Si<Ni> с удельными сопротивлениями  $\rho \sim 10^3$  Ом·см при ИГД (1) и при изменении температуры с помощью электрического нагревателя (2).

Как видно из рис. 2, подвижность носителей заряда в образцах *p*-Si<Ni>, в отличие от *n*-Si<Ni>, уменьшается (рис. 2 кривая 1). При увеличении температуры этих образцов на 7 – 10 °С, с помощью электрического нагревателя подвижность уменьшается на 5 – 6%. Значит, уменьшение подвижности носителей заряда в образцах *p*-Si<Ni> связано частично с изменением температуры и частично с релаксационными эффектами.

Из приведенных данных можно сделать вывод о том, что в образцах *n*-Si<Ni>, и в образцах *p*-Si<Ni> с изменением температуры

подвижность носителей заряда изменяется не значительно.

Но изменение подвижности в образцах с разными типами проводимости имеет разный характер. В образцах  $n\text{-Si}\langle\text{Ni}\rangle$  подвижность увеличивается (на 7 – 8%), а в образцах  $p\text{-Si}\langle\text{Ni}\rangle$  – уменьшается (на 10 – 11%).

Из приведенных экспериментальных результатов видно, что изменение подвижности носителей тока при ИГД в образцах кремния с примесью никеля незначительно. Это говорит о том, что тензоэффект в таких образцах обусловлен в основном изменением концентрации.

В связи с этим нами исследовались изменения концентрации носителей тока в образцах кремния с примесями никеля при ИГД и при изменении температуры с помощью электрического нагревателя.

Как показали экспериментальные результаты, характер изменения концентрации носителей в образцах кремния с ГУ совпадает с характером изменения проводимости этих образцов при ИГД.

Для примера, на рис. 3 приведено относительное изменение концентрации носителей заряда в образцах  $n\text{-Si}\langle\text{Ni}\rangle$  (рис. 3а) и  $p\text{-Si}\langle\text{Ni}\rangle$  (рис. 3б) при ИГД.

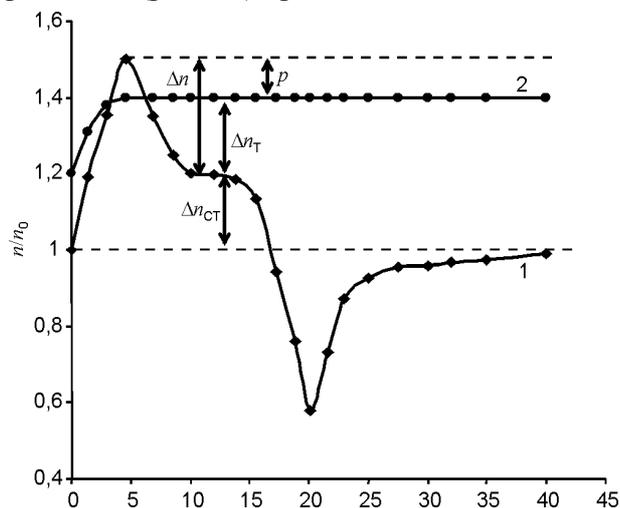


Рис. 3а. Относительное изменение концентрации носителей заряда в образцах  $n\text{-Si}\langle\text{Ni}\rangle$  с удельным сопротивлением  $10^5$  Ом·см при ИГД (1) и при изменении температуры с помощью электрического нагревателя (2).

Видно, что при воздействии импульсного давления, концентрация носителей увеличиваясь, достигает некоторого максимального

значения, далее уменьшится и остается не изменной, равной своему статическому значению.

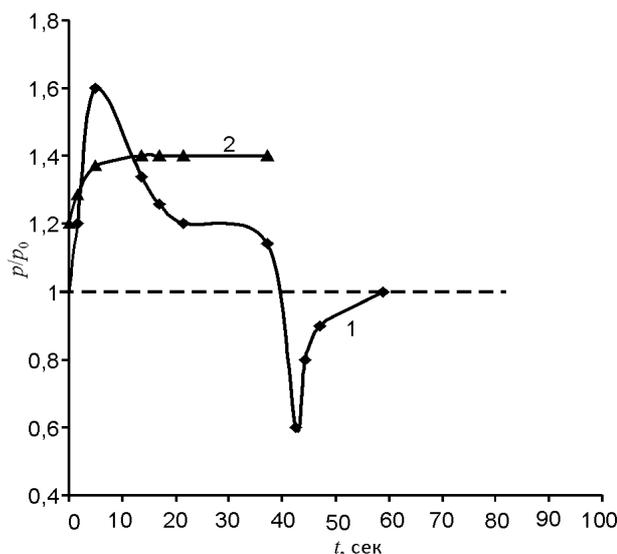


Рис. 3б. Относительное изменение концентрации носителей заряда в образцах  $p\text{-Si}\langle\text{Ni}\rangle$  с удельным сопротивлением  $10^5$  Ом·см при ИГД (1) и при изменении температуры (2).

На рис. 3б приведено относительное изменение концентрации при ИГД в образцах  $p\text{-Si}\langle\text{Ni}\rangle$ . В перекомпенсированных образцах  $p\text{-Si}\langle\text{Ni}\rangle$ , концентрация увеличивается, как и в случае  $n\text{-Si}\langle\text{Ni}\rangle$ , но при этом изменения больше чем в образцах  $n\text{-Si}\langle\text{Ni}\rangle$ . При резком снятии давления, концентрация уменьшается до величины меньшей своего начального значения, далее со временем, увеличивается и принимает первоначальное значения. Для изучения проявления механизмов тензоэффекта в образцах  $\text{Si}\langle\text{Ni}\rangle$  были исследованы относительные изменения концентрации при изменении температуры с помощью электрического нагревателя (рис. 3а, б кривая 2).

Как видно из рис. 3 температурная часть составляет 50% от динамического изменения концентрации. Остальные 50% изменений приходится на долю релаксационных эффектов. Также видно, что как в образцах  $n\text{-Si}\langle\text{Ni}\rangle$ , так и в образцах  $p\text{-Si}\langle\text{Ni}\rangle$  статическая часть изменений концентрации составляет величину примерно равную 40% от общего изменения.

На основании приведенных данных можно сделать вывод о том, что в образцах  $\text{Si}\langle\text{Ni}\rangle$  почти половина динамического тензоэффекта происходит за счет изменения температуры,

а другая половина происходит за счет релаксационных эффектов.

Теперь рассмотрим механизмы проявления тензоэффектов в образцах кремния с глубокими примесными уровнями. Как было показано, токи, протекающие через образцы кремния с ГУ при ИГД увеличиваются до 80%. При этом подвижность носителей заряда увеличивается на 10% относительно первоначального значения. Значит происходящие эффекты в образцах кремния с ГУ при ИГД в основном происходят за счет изменения концентрации. Подвижность изменяется, при ИГД, только за счет изменения температуры, поэтому достаточно рассмотреть изменения концентрации носителей заряда при ИГД.

Известно [7], что концентрация подвижных носителей заряда в кремнии описывается следующим образом:

$$n = n_0 \exp\left(-\frac{E_i}{kT}\right), \quad (1)$$

где  $n_0$  – начальная концентрация,  $E_i$  – энергия ионизация примесей,  $T$  – температура образца,  $k$  – постоянная Больцмана.

При статическом давлении глубокий энергетический уровень смещается в сторону зоны проводимости и значения  $E_i$  уменьшается на величину  $\alpha P$ ,  $\alpha$  – барический коэффициент смещения энергетических уровней полупроводника,  $P$  – величина внешнего давления.

Значит (энергия ионизация ГУ) при воздействии давления может быть выражена так:

$$E_{ip} = E_i - \alpha P, \quad (2)$$

где  $E_i$  – энергия ионизация примесей при давлении,  $\alpha_i$  – барический коэффициент смещения ГУ,  $P$  – приложенное давление.

При статическом давлении изменения концентрации связано только со смещением глубокого уровня. При этом температурная и релаксационная часть изменения концентрации отсутствует. Формулу (1) перепишем с учетом (2)

$$n = n_0 \exp\left(-\frac{E_i - \alpha P}{kT}\right). \quad (3)$$

Выражение (3) показывает что, концентрация подвижных носителей изменяется, в основном, за счет смещения глубокого уровня при статическом давлении.

Далее выражение (3) запишем с учетом воздействию импульсного давления. При воздействии импульсного давления, согласно [4] температура увеличивается на  $\Delta T$ . Тогда выражение (3) принимает вид

$$n = n_0 \exp\left(-\frac{E_i - \alpha P}{k(T + \Delta T)}\right). \quad (4)$$

Общую концентрацию носителей заряда при динамическом воздействии гидростатического давления можно представить в виде:

$$n = n_d + n_{CT}, \quad (5)$$

где,  $n_d$  – динамическая часть изменения концентрации,  $n_{CT}$  – общая концентрация носителей при статическом давлении,

Значит, общая концентрация при ИГД может быть записана так:

$$n = n_d + n_0 \exp\left(-\frac{E_i - \alpha_i P}{kT}\right). \quad (6)$$

С другой стороны общая концентрация носителей при импульсном воздействии гидростатического давления, описывается формулой (4). Приравнявая (4) и (5) получим формулу для динамической части изменений концентрации носителей при ИГД.

$$n_d = n_0 \exp\left(-\frac{E_i - \alpha_i P}{k(T + \Delta T)}\right) - n_0 \exp\left(-\frac{E_i - \alpha P}{kT}\right) \quad (7)$$

Упрощаем последнюю формулу

$$n_d = n_0 \exp\left(-\frac{E_i - \alpha P}{kT}\right) \cdot \left[ \frac{\exp\left(-\frac{E_i - \alpha_i P}{k(T + \Delta T)}\right)}{\exp\left(-\frac{E_i - \alpha_i P}{kT}\right)} - 1 \right], \quad (8)$$

$$n_d = n_{CT} \left( \exp\left(\frac{\Delta E}{kT} \frac{\Delta T}{T + \Delta T}\right) - 1 \right), \quad (9)$$

где  $n_{CT}$  – общая концентрация носителей при воздействии статического давления.  $\Delta E = E_i - \alpha_i P$  – изменения энергетического уровня при давлении  $P$ . Относительное изменение температуры обозначим так

$$\epsilon_T = \frac{\Delta T}{T + \Delta T}. \quad (10)$$

Поскольку  $\Delta T$  зависит от амплитудных значений импульсного давления и от кристалли-

ческих свойств полупроводника, то в разных температурных условиях и при одинаковых значениях и скорости изменения импульсного давления можно предположить, что  $\epsilon_T$  зависит только от начальной температуры  $T$ . Отсюда, чем меньше  $T$ , тем больше  $\epsilon_T$ . Формулу (9) перепишем с учетом (10)

$$n_d = n_{CT} \left( \exp \left( \epsilon_T \frac{\Delta E_i}{kT} \right) - 1 \right). \quad (11)$$

При низких температурах можно считать, что  $\exp \left( \epsilon_T \frac{\Delta E_i}{kT} \right) \gg 1$  и формула (11) примет вид

$$n_d = n_{CT} \exp \left( \epsilon_T \frac{\Delta E_i}{kT} \right). \quad (12)$$

Из полученного выражения видно, что чем меньше начальная температура, тем больше динамическая часть изменений концентрации носителей заряда в образцах кремния с глубокими примесными уровнями.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Полякова А.А. Деформация полупроводников и полупроводниковых приборов. – М.: Энергия, 1979. – 168 с.
2. Болтакс Б.И., Бахадырханов М.К., Городецкий С.М., Куликов Г.С. Компенсированный кремний. – Л.: 1972. – 121 с.
3. Абдураимов А., Зайнабидинов С.З., Маматкаримов О.О., Турсунов И.Г., Химаткулов О. Динамическая проводимость компенсированного кремния при всестороннем гидростатическом сжатии//ФТП. – 1993. – Т. 27, Вып. 3. – С. 516-519.
4. Шейкман М.К., Шик А.Я. Долговременные релаксации и остаточная проводимость в полупроводниках//ФТП. – 1976. – Т. 10, Вып. 2. – С.203-233.

5. Абдураимов А., Зайнабидинов С.З., Маматкаримов О.О., Химаткулов О., Худайбергенов Т.Э. Установка гидростатического давления с пневмоусилителем для исследования тензосвойств полупроводниковых материалов//ПТЭ. – 1988. – № 5. – С. 229-231.
6. Zainabidinov S.Z., Mamatkarimov O.O., Tursunov I., Tuyschie U. Dinamic syrain conductivity of compensated silicon//Modern phisics litters B. – 1998. – Vol. 12, № 9. – P. 335-341.
7. Фистуль В.И. Введение в физику полупроводников. – М.: Высшая школа, 1984.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Polyakova A.A. Deformaciya poluprovodnikov i poluprovodnikovyh priborov. – М.: Energiya, 1979. – 168 s.
2. Boltaks B.I., Bahadyrhanov M.K., Gorodeckij S.M., Kulikov G.S. Kompensirovannyj kremnij. – L.: 1972. – 121 s.
3. Abduraimov A., Zajnabidinov S.Z., Mamatkarimov O.O., Tursunov I.G., Himmatkulov O. Dinamicheskaya provodimost kompensirovannogo kremniya pri vsestoronnem gidrostaticheskom szhatii//FTP. – 1993. – Т. 27, Вып. 3. – С. 516-519.
4. Shejkman M.K., Shik A.Ya. Dolgovremennye relaksacii i ostatochnaya provodimost v poluprovodnikah//FTP. – 1976. – Т. 10, Вып. 2. – С. 203-233.
5. Abduraimov A., Zajnabidinov S.Z., Mamatkarimov O.O., Himatkulov O., Hudajbergenov T.E. Ustanovka gidrostaticheskogo davleniya s pnevmousilitelem dlya issledovaniya tenzovojstv poluprovodnikovyh materialov//PTE. – 1988. – № 5. – С. 229-231.
6. Zainabidinov S.Z., Mamatkarimov O.O., Tursunov I., Tuyschie U. Dinamic syrain conductivity of compensated silicon//Modern phisics litters B. – 1998. – Vol. 12, № 9. – P. 335-341.
7. Fistul V.I. Vvedenie v fiziku poluprovodnikov. – М.: Vysshaya shkola, 1984.