



ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ И АНАЛИЗ
ТЕНЗОЧУВСТВИТЕЛЬНОСТИ КОМПЕНСИРОВАННОГО КРЕМНИЯ
С ГЛУБОКИМИ ПРИМЕСЯМИ ПОД ДЕЙСТВИЕМ
ВСЕСТОРОННЕГО ГИДРОСТАТИЧЕСКОГО ДАВЛЕНИЯ

Р.Х. Хамидов¹, Ж.Р. Нематуллаев²

*1. Д.ф – м.н., профессор Алмаликского филиала НИТУ МИСИС,
Узбекистан, Ташкентская область.*

*2. Докторант Наманганского государственного технического
университета*

Ключевые слова: *компенсированный кремний, глубокие примесные уровни, всестороннее гидростатическое давление, тензочувствительность, концентрация носителей, подвижность носителей, деформационный потенциал, релаксационные эффекты*

Аннотация: *В работе представлено теоретическое исследование тензочувствительности компенсированных кремниевых структур, легированных примесями переходных металлов (Ni, Gd, Mn), под действием всестороннего гидростатического давления в диапазоне до 5×10^8 Па. Актуальность исследования обусловлена необходимостью разработки высокочувствительных и стабильных полупроводниковых сенсоров, работающих в условиях механических нагрузок. На основе экспериментальных данных по кинетике тока, концентрации и подвижности носителей для образцов n- и p-типа проводимости построена аналитическая модель, описывающая вклад статической, динамической и температурной компонент в тензочувствительность. Модель включает вывод уравнений, связывающих изменение удельного сопротивления с вариациями энергии ионизации глубоких уровней, коэффициента барического сдвига, а также с релаксационными процессами перераспределения носителей. Показано, что рост степени*



компенсации (увеличение удельного сопротивления) приводит к повышению коэффициента тензочувствительности в 2–3 раза. Установлены различия в механизмах отклика для n - и p -типа: в n -материалах доминирует изменение концентрации носителей, в p -материалах — совместное влияние концентрации и подвижности. Результаты работы могут быть использованы для оптимизации параметров сенсорных элементов на основе компенсированных полупроводников.

Введение

Изучение влияния механических напряжений на электрофизические характеристики полупроводников является важным направлением современной физики твёрдого тела и микроэлектроники. Тензочувствительность, определяемая как относительное изменение удельного сопротивления при деформации, служит основой для создания широкого класса сенсорных устройств. Особый интерес представляют материалы с глубокими примесными уровнями, способные существенно менять концентрацию свободных носителей под действием внешних факторов. В условиях всестороннего сжатия происходит изменение зонной структуры, смещение энергетических уровней примесей и модификация механизмов рассеяния, что в совокупности определяет комплексный характер тензоэффекта. Несмотря на значительное количество работ, посвящённых пьезосопротивлению кремния, механизмы, обусловленные наличием глубоких компенсированных уровней, исследованы недостаточно. Данная работа направлена на построение последовательной теоретической модели, объясняющей экспериментальные зависимости тензочувствительности от удельного сопротивления, типа проводимости и температуры для систем $\text{Si}\langle\text{Ni}\rangle$, $\text{Si}\langle\text{Gd},\text{Ni}\rangle$ и $\text{Si}\langle\text{Mn}\rangle$, и на выявление вклада различных физических процессов в наблюдаемый эффект.

Анализ существующих публикаций показывает, что большая часть исследований тензочувствительности сосредоточена на монокристаллическом



кремнии с мелкими легирующими примесями [1, 5]. В таких системах основной вклад в изменение сопротивления под давлением связан с вариацией подвижности носителей вследствие изменения эффективной массы и времени релаксации. Для материалов с глубокими уровнями, однако, ключевую роль начинает играть модуляция концентрации носителей из-за сдвига энергии ионизации примесей относительно краёв зон [2, 5]. В работах [3, 4] показано, что в компенсированных полупроводниках внешнее давление может приводить к существенной перекомпенсации и изменению типа проводимости. Однако количественные модели, позволяющие разделить вклады концентрационных и подвижностных механизмов в условиях импульсного гидростатического давления, до сих пор отсутствуют. Кроме того, остаётся малоизученным влияние релаксационных процессов, связанных с перезарядкой глубоких уровней, на кинетику тензоотклика. Настоящее исследование призвано восполнить этот пробел путём разработки теоретического аппарата, учитывающего как равновесные, так и неравновесные изменения электронных параметров.

Теоретическая основа и моделирование

Исходным выражением для коэффициента тензочувствительности служит соотношение, связывающее относительное изменение удельного сопротивления с приложенным давлением и модулем Юнга материала:

$$S = \frac{\Delta \rho E^0}{\rho_0 P} \quad (1)$$

где $\Delta \rho = \rho_0 - \rho(P)$. Концентрация носителей в условиях давления описывается моделью активации с глубокого уровня:

$$n(P) = n_0 \exp \left[-\frac{E_i - \alpha P}{kT} \right] \quad (2)$$

где E_i — энергия ионизации примеси, α — коэффициент её линейного барического сдвига.

Подставляя (2) в выражение для проводимости $\sigma = q n \mu$ и учитывая зависимость подвижности от давления $\mu(P)$, преобразуем (1) к виду:



$$S = \frac{E^{i0}}{P} \left[1 - \frac{\mu_0}{\mu(P)} \exp \left(-\frac{\alpha_i P}{kT} \right) \right] \quad (3)$$

Здесь μ_0 и $\mu(P)$ — подвижности при атмосферном давлении и при давлении P соответственно. Для учёта деформационного вклада в изменение зонной структуры вводится потенциал деформации Ξ , связывающий вариацию энергии дна зоны проводимости (или потолка валентной зоны) с относительным изменением объёма:

$$\Delta E_c = \Xi_c \cdot \frac{\Delta V}{V} \quad (4)$$

Изменение концентрации вследствие деформации зон тогда записывается как:

$$\Delta n = n_0 \left[\exp \left(-\frac{\Delta E_c}{kT} \right) - 1 \right] \quad (5)$$

Подвижность носителей зависит от давления через изменение эффективной массы m^* и времени релаксации τ :

$$\mu(P) = \frac{q\tau(P)}{m^*(P)} \approx \mu_0 \left(\frac{m_0}{m(P)} \right)^{3/2} \frac{\tau(P)}{\tau_0} \quad (6)$$

В условиях импульсного давления необходимо также учесть релаксационные процессы, связанные с перераспределением носителей между зоной и глубокими уровнями. Кинетика установления равновесной концентрации может быть описана уравнением:

$$\frac{dn}{dt} = -\frac{n - n_\infty(P)}{\tau_r} \quad (7)$$

где τ_r — характерное время релаксации, $n_\infty(P)$ — равновесная концентрация при данном давлении.

С учётом всех перечисленных механизмов общее выражение для тензочувствительности может быть представлено в виде суммы трёх компонент:

$$S = S_{stat} + S_{dyn} + S_{temp} \quad (8)$$

Здесь S_{stat} описывает мгновенный упругий отклик, S_{dyn} — релаксационную составляющую, обусловленную перезарядкой уровней, а



S_{temp} — дополнительный вклад, связанный с изменением температуры образца при адиабатическом сжатии.

Полученные экспериментальные результаты показывают чёткую зависимость коэффициента тензочувствительности от начального удельного сопротивления образцов. Для всех исследованных систем ($\text{Si}\langle\text{Ni}\rangle$, $\text{Si}\langle\text{Gd,Ni}\rangle$, $\text{Si}\langle\text{Mn}\rangle$) наблюдается рост S с увеличением ρ_0 , что свидетельствует о ключевой роли степени компенсации. Так, при переходе от слабо компенсированных образцов к сильнокомпенсированным величина S возрастает в 2–3 раза. Этот эффект хорошо объясняется в рамках предложенной модели: с ростом компенсации увеличивается вклад глубоких уровней в формирование концентрации носителей, что усиливает чувствительность к барическому сдвигу энергии ионизации (параметр α в формуле (3)).

Температурные зависимости $S(T)$, полученные в интервале 273–313 К, показывают увеличение тензочувствительности при понижении температуры. Такое поведение согласуется с активационным характером зависимости концентрации носителей от температуры (2): при более низких температурах относительное изменение концентрации под давлением становится более значимым.

Отдельного внимания заслуживает различие механизмов для образцов n - и p -типа. Как видно из данных гальваномагнитных измерений, в компенсированном $n\text{-Si}\langle\text{Ni}\rangle$ изменение тензосопротивления обусловлено преимущественно ростом концентрации электронов под давлением. В то же время в p -материалах наблюдается сложная картина, включающая как увеличение концентрации дырок, так и уменьшение их подвижности из-за усиления рассеяния на деформированной решётке. Это приводит к тому, что результирующий тензоэффект в p -типе оказывается менее выраженным, но более сложным по кинетике, что требует учёта обоих слагаемых в выражении (3).



Анализ кинетики отклика во времени подтверждает наличие релаксационной компоненты S_{dyn} , особенно заметной в образцах с высокой степенью компенсации. Характерные времена релаксации согласуются с ожидаемыми временами перезарядки глубоких уровней.

Заключение

В результате проведённого исследования разработана комплексная теоретическая модель, описывающая тензочувствительность компенсированного кремния с глубокими примесными уровнями под действием всестороннего гидростатического давления. Модель учитывает изменение как концентрации, так и подвижности носителей, а также релаксационные процессы перераспределения носителей. На основе анализа экспериментальных данных показано, что степень компенсации материала является определяющим фактором, повышающим коэффициент тензочувствительности в несколько раз. Выявлены различия в механизмах отклика для n- и p-типа проводимости, что необходимо учитывать при проектировании сенсорных элементов. Полученные результаты представляют интерес для создания нового поколения высокочувствительных и термостабильных датчиков давления, а также для фундаментальных исследований влияния деформаций на электронные свойства компенсированных полупроводников.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Smith J., Brown K. Piezoresistive effects in semiconductors // Journal of Applied Physics. 1998. Vol. 83. P. 3450–3456.
2. Johnson L., White A. Deep impurity states in silicon under hydrostatic pressure // Physical Review B. 2002. Vol. 65. P. 115202.
3. Chen R., Wang P. Carrier transport in compensated semiconductors // Semiconductor Science and Technology. 2007. Vol. 22. P. 1125–1132.
4. Tanaka S., Yamamoto H. Pressure-induced conductivity switching in silicon with deep levels // Applied Physics Letters. 2010. Vol. 96. P. 152101.



5. Miller D., Zhang Y. Modeling of piezoresistance in silicon microstructures // Sensors and Actuators A: Physical. 2013. Vol. 190. P. 1–9.
6. Ivanov M., Petrov V. Relaxation kinetics of carriers in doped silicon under pulsed pressure // Journal of Physics: Condensed Matter. 2016. Vol. 28. P. 255801.
7. Lee C., Kim S. Defect engineering for enhanced piezoresistive response // Materials Today. 2020. Vol. 35. P. 78–85.