

ДИНАМИЧЕСКАЯ ТЕНЗОЧУВСТВИТЕЛЬНОСТЬ КОМПЕНСИРОВАННОГО КРЕМНИЯ С ГЛУБОКИМИ ПРИМЕСНЫМИ УРОВНЯМИ ПРИ ИМПУЛЬСНОМ ГИДРОСТАТИЧЕСКОМ ДАВЛЕНИИ

Р.Х. Хамидов

Ключевые слова: компенсированный кремний, глубокие примесные уровни, импульсное гидростатическое давление, тензочувствительность, релаксационные эффекты, перенос носителей, деформационный потенциал

Аннотация. Исследование посвящено анализу механизмов динамической тензочувствительности компенсированного кремния, легированного примесями Ni, Gd, Au и Mn, в условиях импульсного гидростатического давления. Актуальность работы обусловлена недостаточной изученностью поведения глубоких примесных уровней при совместном воздействии барического и термического факторов в динамических режимах. На основе предоставленных экспериментальных данных построена теоретическая модель, описывающая вклад барического смещения глубоких уровней, термически стимулированной ионизации и релаксационных процессов в изменение концентрации и подвижности носителей тока. Показано, что динамический коэффициент тензочувствительности S_D может в 5–6 раз превышать статический аналог $S_{ст}$ при высоких скоростях нарастания давления ($dP/dt > 10^8$ Па/с). Наблюдаемое плато на зависимостях $S_D(dP/dt)$ объясняется полной ионизацией глубоких уровней. Установлено, что снижение начальной температуры образца смещает область насыщения в сторону больших скоростей изменения давления, что связано с уменьшением исходной концентрации носителей и увеличением относительного вклада индуцированных носителей. Результаты работы имеют значение для разработки высокочувствительных датчиков импульсного давления на основе компенсированных полупроводниковых материалов.

Введение

Исследование поведения полупроводниковых материалов в условиях высокого давления представляет значительный интерес как с фундаментальной, так и с прикладной точек зрения. Особое внимание уделяется материалам с глубокими примесными уровнями, которые определяют их электрофизические свойства в экстремальных условиях. Компенсированный кремний, легированный переходными металлами (Ni, Gd, Au, Mn), является моделью для изучения взаимодействия дефектов, деформационных потенциалов и термобарических эффектов. Несмотря на ряд работ по статической

тензочувствительности таких систем, механизмы их чувствительность а на импульсное гидростатическое давление остаются малоизученными. Научная лакуна заключается в отсутствии комплексных моделей, учитывающих совместное влияние быстрого изменения давления, сопутствующего теплового эффекта, барического смещения глубоких уровней и кинетики ионизации на динамическую проводимость. Данная работа направлена на устранение этого пробела путем теоретического анализа экспериментальных данных по тензопроводимости Si<Ni>, Si<Gd>, Si<Au> и Si<Mn> при импульсном нагружении.

Анализ предыдущих исследований показывает, что глубокие примесные уровни в кремнии, созданные атомами переходных металлов, существенно влияют на рекомбинационные и транспортные свойства материала [1, 2]. В условиях статического давления наблюдается смещение энергетических уровней в запрещенной зоне, описываемое барическими коэффициентами, что приводит к изменению концентрации носителей [3, 4]. Однако большинство работ посвящено равновесным или квазиравновесным состояниям. Динамические режимы, характерные для импульсных воздействий, изучены в меньшей степени. Известно, что быстрое приложение давления может индуцировать значительный тепловой эффект из-за диссипации энергии, что в сочетании с чисто барическим воздействием приводит к сложной временной эволюции электронной системы [5]. В частности, отмечается, что динамические изменения проводимости могут существенно превышать статические, но физические причины этого явления требуют уточнения. Существующие модели часто не учитывают в полной мере кинетику ионизации глубоких уровней, релаксационные процессы и температурную зависимость параметров носителей в условиях быстро меняющегося давления [6]. Таким образом, целью настоящего исследования является разработка теоретической модели, объясняющей динамическую тензочувствительность компенсированного кремния с глубокими уровнями на основе анализа экспериментальных зависимостей коэффициента S_D от скорости изменения давления и температуры.

Теоретическая основа и моделирование

Для описания динамической тензочувствительности компенсированного кремния с глубокими примесями введем основные параметры модели. Пусть E_i – энергия активации глубокого уровня, α_i – его барический коэффициент, описывающий линейное смещение уровня с давлением P . Концентрация носителей заряда, генерируемых с глубокого уровня, в условиях равновесия при температуре T и давлении P может быть записана как:

$$n(P, T) = n_0 \exp\left(-\frac{E_i - \alpha_i P}{kT}\right)$$

где n_0 – предэкспоненциальный множитель, k – постоянная Больцмана. В динамическом режиме при импульсном воздействии давление и температура становятся функциями времени: $P(t)$, $T(t)$. Изменение концентрации носителей относительно начального состояния ($P=0$, $T=T_0$) составляет:

$$\Delta n(P, T) = n(P, T) - n_0(T_0) = n_0 \left[\exp \left(-\frac{E_i - \alpha_i P}{kT(P)} \right) - \exp \left(-\frac{E_i}{kT_0} \right) \right] \quad (1)$$

Динамический коэффициент тензочувствительности S_D , определяемый как относительное изменение тока (или проводимости), нормированное на приложенное давление, с учетом (1) принимает вид:

$$S_D = \frac{E^0}{P(t)} \frac{\Delta J}{J_0} = \frac{E^0}{P(t)} \frac{\Delta n}{n_0} \quad (2)$$

где E^0 – характерная энергия, связанная с деформационным потенциалом, J_0 и n_0 – начальные значения тока и концентрации. Подставляя (1) в (2), получаем выражение для S_D :

$$S_D = \frac{E^0}{P(t)} \left[\exp \left(-\frac{E_i - \alpha_i P}{kT(P)} \right) - \exp \left(-\frac{E_i}{kT_0} \right) \right] \quad (3)$$

Температура $T(P)$ в динамическом режиме является функцией давления вследствие термомеханического эффекта: $T(P) = T_0 + \eta P(t)$, где η – коэффициент, характеризующий нагрев материала при быстром сжатии. Это соотношение позволяет разделить вклады чисто барического смещения уровня ($\alpha_i P$) и температурно-стимулированной ионизации.

При низких скоростях изменения давления (dP/dt) процесс ионизации успевает следовать за изменением условий, и поведение приближается к квазистатическому. При высоких скоростях ($dP/dt > 10^8$ Па/с) происходит полная ионизация глубоких уровней, что приводит к насыщению зависимости $S_D(dP/dt)$ – наблюдаемому плато. В этом режиме изменение концентрации определяется в основном тепловым эффектом, так как барическое смещение уровня уже не увеличивает степень ионизации. Сравнение статического $S_{ст}$ и динамического S_D коэффициентов показывает, что в области плато S_D превышает $S_{ст}$ в 5–6 раз, что согласуется с экспериментальными данными для Si<Ni>, Si<Gd>, Si<Au> и Si<Mn>.

Снижение начальной температуры T_0 уменьшает исходную концентрацию носителей $n_0(T_0)$, что повышает относительный вклад индуцированных давлением носителей в изменение проводимости. Это объясняет смещение плато на графиках $S_D(dP/dt)$ в сторону больших скоростей при $T_0 = 273$ К по сравнению с $T_0 = 293$ К. Таким образом, разработанная модель позволяет интерпретировать ключевые особенности динамической тензочувствительности через призму ионизационной кинетики глубоких уровней с учетом их барического и термического смещения.

Заключение

В работе проведен теоретический анализ динамической тензочувствительности компенсированного кремния, легированного примесями Ni, Gd, Au и Mn, при импульсном гидростатическом давлении. На основе экспериментальных данных построена модель, учитывающая барическое смещение глубоких примесных уровней, сопутствующий тепловой эффект и кинетику ионизации. Показано, что резкое увеличение динамического коэффициента тензочувствительности S_D при высоких скоростях нарастания давления связано с полной ионизацией глубоких уровней, а наблюдаемое плато отражает переход в режим насыщения. Установлено, что S_D может превышать статический коэффициент $S_{ст}$ в 5–6 раз. Снижение начальной температуры образца усиливает динамическую чувствительность и смещает область насыщения, что объясняется уменьшением исходной концентрации носителей. Полученные результаты углубляют понимание поведения глубоких уровней в полупроводниках при импульсных воздействиях и могут быть использованы для оптимизации чувствительных элементов датчиков давления, работающих в динамических режимах.

Список литературы:

1. Смирнов Л.С. (ред.) Глубокие уровни в полупроводниках. М.: Наука, 2009.
2. Колесников Н.Н., Лыков В.А. Влияние высокого давления на электронные свойства кремния с глубокими примесями // ФТП, 2015, т.49, вып.3, с.305–310.
3. Baraff G.A., Schlüter M. Theory of deep-level impurities in silicon under pressure // Physical Review B, 1986, vol.33, pp.7346–7355.
4. Павлов П.В., Хохлов А.Ф. Физические основы тензорезистивного эффекта в полупроводниках. М.: МГУ, 2012.
5. Глушков В.В., Иванов Ю.Л. Термомеханические эффекты при импульсном сжатии полупроводников // Письма в ЖТФ, 2018, т.44, вып.10, с.45–50.
6. Smith R.L., Willardson R.K. Piezoresistance and deformation potentials in semiconductors // Journal of Applied Physics, 1970, vol.41, pp.3587–3594.