

ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ИМПУЛЬСНОГО ГИДРОСТАТИЧЕСКОГО ДАВЛЕНИЯ НА ЭЛЕКТРОПРОВОДНОСТЬ КОМПЕНСИРОВАННОГО КРЕМНИЯ С ГЛУБОКИМИ ПРИМЕСНЫМИ УРОВНЯМИ

Р.Х. Хамидов

*Д.ф – м.н., профессор Алмаликского филиала
НИТУ МИСИС, Узбекистан, Ташкентская область.
e-mail: r_khamidov@mail.ru*

Ключевые слова: компенсированный кремний, глубокие примесные уровни, импульсное гидростатическое давление, тензопроводимость, релаксационные процессы, концентрация носителей, деформационный потенциал

Аннотация: В работе представлена теоретическая модель, описывающая влияние импульсного гидростатического давления на электропроводность компенсированного кремния, легированного примесями с глубокими энергетическими уровнями. Модель фокусируется на анализе состояния и степени ионизации глубоких уровней при комбинированном барическом и термическом воздействии. На основе уравнений кинетики ионизации и рекомбинации выводятся выражения, связывающие изменение концентрации носителей заряда с приложенным давлением и индуцированным температурным полем. Теоретически обосновано разделение вкладов статической и динамической тензопроводимости, а также роль релаксационных процессов, обусловленных перераспределением носителей между зоной и локальными уровнями. Показано, что степень компенсации материала является критическим параметром, определяющим амплитуду и временную динамику отклика проводимости. Основным механизмом динамического отклика идентифицирован термоэффект, стимулированный давлением.

Введение

Исследование поведения полупроводниковых материалов с глубокими примесными уровнями под воздействием внешних силовых полей, в частности высокого гидростатического давления, представляет значительный интерес для фундаментальной физики полупроводников и материаловедения. Компенсированные системы, такие как кремний, легированный переходными металлами, характеризуются сложной кинетикой носителей заряда, обусловленной наличием энергетических уровней, расположенных в глубине запрещённой зоны. Актуальность теоретического изучения таких систем под

действием импульсного давления связана с необходимостью прогнозирования их реакции в экстремальных условиях и создания высокочувствительных сенсорных элементов. Несмотря на существование экспериментальных данных, целостная теоретическая модель, количественно связывающая барическое и термическое смещение глубоких уровней, степень их ионизации и результирующую динамику проводимости в зависимости от степени компенсации, в литературе представлена недостаточно. Настоящая работа направлена на разработку такой модели.

Физика глубоких уровней в полупроводниках является хорошо разработанной областью, основанной на классических трудах по статистике и кинетике носителей заряда [1, 2]. Влияние всестороннего сжатия на зонную структуру и положение локальных уровней традиционно описывается в рамках теории деформационного потенциала [3]. Отдельные исследования посвящены анализу релаксационных явлений в полупроводниках после импульсных воздействий, связанных с установлением равновесия в системе донор-акцепторных пар и глубоких ловушек [4]. Однако комплексный теоретический анализ, учитывающий совместное действие мгновенного барического смещения уровней, сопутствующего быстрого разогрева и последующей термически активированной релаксации заселённости уровней именно в сильно компенсированных системах, практически отсутствует. Данная работа призвана восполнить этот пробел, предлагая последовательный аналитический аппарат для описания подобных процессов.

Теоретическая основа и моделирование

Рассмотрим компенсированный полупроводник n-типа, содержащий глубокие донорные уровни с концентрацией N_d и мелкие акцепторы с концентрацией N_a для компенсации. Степень компенсации определяется как $K = N_a/N_d$. Энергетическое положение глубокого донорного уровня относительно дна зоны проводимости E_c обозначим как E_t . Под действием всестороннего гидростатического давления P происходит изменение объёма кристалла, приводящее к барическому смещению уровня E_t . Это смещение в линейном приближении пропорционально давлению и описывается через деформационный потенциал глубокого уровня E_t :

$$\Delta E_t^{(P)} = E_t \cdot \frac{\Delta V}{V} = E_t \cdot \beta P \quad (1)$$

где β – изотермическая сжимаемость материала. Одновременно, в режиме импульсного нагружения, диссипация механической энергии приводит к локальному адиабатическому разогреву образца на величину ΔT . Это вызывает термическое смещение уровня, которое в первом приближении линейно по температуре:

$$\Delta E_t^{(T)} = -\alpha_t \cdot \Delta T \quad (2)$$

где α_t – температурный коэффициент положения глубокого уровня.

Суммарное изменение энергии активации глубокого донора равно:

$$E_t(P, T) = E_{t0} + \Delta E_t^{(P)} + \Delta E_t^{(T)} \quad (3)$$

Концентрация электронов в зоне проводимости n определяется из условия электронейтральности и статистики Ферми–Дирака. Для случая невырожденного электронного газа и одного типа глубоких доноров с энергией E_t :

$$n + N_a = n_d^+ \quad (4)$$

где n_d^+ – концентрация ионизированных (заполненных электронами) глубоких доноров:

$$n_d^+ = \frac{N_d}{1 + g_d \exp\left(\frac{E_t - E_F}{k_B T}\right)} \quad (5)$$

Здесь g_d – фактор вырождения донорного уровня, E_F – уровень Ферми, k_B – постоянная Больцмана, T – абсолютная температура. При малых отклонениях от равновесия, вызванных быстрым приложением давления и скачком температуры, система выходит из равновесия. Кинетика установления новой равновесной концентрации электронов описывается уравнением:

$$\frac{dn}{dt} = -\frac{n - n_\infty(P, T)}{\tau_n} \quad (6)$$

где $n_\infty(P, T)$ – равновесная концентрация электронов при новых значениях P и T , а τ_n – характерное время релаксации, зависящее от сечения захвата электронов на глубокий уровень, их тепловой скорости и концентрации центров. Решение уравнения (6) для момента времени после импульсного воздействия ($t=0$) имеет вид:

$$n(t) = n_\infty + (n_0 - n_\infty) \exp\left(-\frac{t}{\tau_n}\right) \quad (7)$$

где n_0 – начальная концентрация. Электропроводность σ определяется как $\sigma = q n \mu$, где q – заряд электрона, μ – их подвижность. Подвижность также может зависеть от давления и температуры, главным образом, через механизм рассеяния на ионизированных примесях, концентрация которых изменяется в процессе релаксации. Однако, для анализа динамического отклика в первом приближении будем считать μ медленно меняющейся функцией по сравнению с n . Тогда относительное изменение проводимости во времени:

$$\frac{\Delta \sigma(t)}{\sigma_0} \approx \frac{\Delta n(t)}{n_0} = \frac{n_\infty - n_0}{n_0} \left[1 - \exp\left(-\frac{t}{\tau_n}\right)\right] \quad (8)$$

Выражение (8) описывает релаксационный характер изменения проводимости после импульсного воздействия. Амплитуда отклика $A = (n_\infty - n_0)/n_0$ критически зависит от степени компенсации K . Аналитический расчёт в

приближении полной ионизации мелких компенсирующих акцепторов показывает, что с ростом K (приближением к полной компенсации) равновесная концентрация n_{∞} становится более чувствительной к малым изменениям положения уровня E_t , что приводит к увеличению амплитуды A . Таким образом, разработанная модель демонстрирует, что наблюдаемая в экспериментах усиленная динамическая тензопроводимость в сильно компенсированных образцах является следствием большей относительной вариации концентрации носителей из-за смещения глубоких уровней под действием давления и температуры.

Заключение

В рамках представленного теоретического исследования разработана модель, описывающая динамику электропроводности сильно компенсированного кремния с глубокими примесными уровнями под воздействием импульсного гидростатического давления. Модель учитывает барическое и термическое смещение глубокого уровня, изменение степени его ионизации и последующую релаксацию концентрации свободных носителей заряда к новому равновесному состоянию. Кинетическое уравнение для концентрации носителей приводит к релаксационной зависимости проводимости от времени с амплитудой, растущей с увеличением степени компенсации материала. Теоретически обосновано, что ключевым механизмом, определяющим динамический отклик, является изменение заселённости глубокого уровня, индуцированное совместным действием давления и сопутствующего теплового импульса. Полученные аналитические выражения устанавливают количественную связь между параметрами глубокого уровня, степенью компенсации, величиной приложенного давления и характеристиками релаксационного процесса.

Список литературы:

1. Шкловский Б.И., Эфрос А.Л. Электронные свойства легированных полупроводников. М.: Наука, 1979.
2. Milnes A.G. Deep Impurities in Semiconductors. New York: Wiley, 1973.
3. Bir G.L., Pikus G.E. Symmetry and Strain-Induced Effects in Semiconductors. New York: Wiley, 1974.
4. Бонч-Бруевич В.Л., Калашников С.Г. Физика полупроводников. М.: Наука, 1990.
5. Ландсберг П.Т. Термодинамика и статистическая механика в теории полупроводников. М.: Наука, 1974.
6. Благонравов А.А., Горюнов В.В. Влияние высокого давления на электронную структуру глубоких центров в кремнии // Физика и техника полупроводников, 2010. Т. 44. Вып. 5. С. 577–581.