



ТЕОРЕТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ МЕХАНИЗМОВ
ТЕНЗОЧУВСТВИТЕЛЬНОСТИ ДИОДОВ ШОТТКИ НА ОСНОВЕ
КОМПЕНСИРОВАННОГО КРЕМНИЯ С ГЛУБОКИМИ УРОВНЯМИ
ПРИ ВСЕСТОРОННЕМ ГИДРОСТАТИЧЕСКОМ ДАВЛЕНИИ

Р.Х. Хамидов

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

Ключевые слова: *компенсированный кремний, глубокие примесные уровни, диод Шоттки, всестороннее гидростатическое давление, тензочувствительность, концентрация носителей, обратная связь, тензодатчики*

Аннотация: *Исследование посвящено теоретическому анализу механизмов тензоэлектрического эффекта в диодах Шоттки, изготовленных на основе компенсированного кремния с глубокими примесными уровнями ($Si\langle Ni \rangle$), в условиях всестороннего гидростатического давления. На основе предоставленных экспериментальных данных построена теоретическая модель, объясняющая аномальное увеличение прямого тока в структурах типа $Au-Si\langle Ni \rangle-Sb$ при сжатии, несмотря на рост высоты потенциального барьера. Модель учитывает изменение электрофизических параметров базы — концентрации и подвижности носителей, а также эффект положительной обратной связи, обусловленный уменьшением сопротивления базы и толщины запирающего слоя. Показано, что основную роль в усилении тензочувствительности играет барически индуцированное увеличение концентрации электронов в результате смещения глубокого уровня никеля, а также перераспределение падения напряжения между барьером и базой. Результаты работы имеют значение для разработки высокочувствительных*



тензопреобразователей на основе компенсированных полупроводниковых структур.

Введение.

Изучение тензоэлектрических свойств полупроводниковых структур, в частности диодов с барьером Шоттки, представляет значительный интерес как с фундаментальной, так и с прикладной точки зрения, особенно в контексте создания высокочувствительных датчиков давления и деформации [1]. Большинство исследований до сих пор было сосредоточено на эффектах анизотропной деформации, в то время как влияние всестороннего гидростатического давления (ВГД) на электрофизические характеристики полупроводниковых структур, особенно на основе компенсированных материалов с глубокими примесными уровнями, изучено недостаточно [2]. Такие материалы, как кремний, легированный никелем ($\text{Si}\langle\text{Ni}\rangle$), характеризуются высокой чувствительностью к внешним воздействиям, однако механизмы их реакции на изотропное давление требуют детального теоретического осмысления. Данная работа направлена на заполнение этой научной лакуны путём построения теоретической модели, объясняющей экспериментально наблюдаемые тензоэлектрические эффекты в диодах Шоттки на основе $\text{Si}\langle\text{Ni}\rangle$.

Преыдушие исследования показали, что тензочувствительность полупроводниковых структур, в частности диодов с барьером Шоттки, в основном связывается с изменением высоты потенциального барьера и эффективной массы носителей при деформации [1,3]. Однако в случае компенсированных полупроводников с глубокими уровнями, таких как $\text{Si}\langle\text{Ni}\rangle$, ключевую роль могут играть изменения электрофизических параметров объёмной области (базы) — концентрации носителей, подвижности и сопротивления [4,5]. Работы указывают на важность учёта именно этих параметров при анализе тензоэффекта в условиях всестороннего сжатия. Кроме того, в литературе практически отсутствуют модели,

описывающие совместное влияние ВГД на барьерные и базовые свойства структур, что и определяет актуальность настоящего теоретического исследования.

Теоретическая основа и моделирование.

На основании предоставленных экспериментальных данных, показывающих рост прямого тока в диодах Au-Si<Ni>-Sb при ВГД, несмотря на увеличение высоты потенциального барьера, была разработана модель, учитывающая две основные взаимосвязанные группы процессов. Во-первых, под действием давления происходит смещение глубокого уровня никеля (E_{Ni}), что приводит к изменению концентрации электронов в базе. Эта зависимость может быть описана выражением:

$$n(P) = n_0 \cdot \exp\left(\frac{\alpha_{Ni}P}{kT}\right) \quad (1)$$

где α_{Ni} — барический коэффициент изменения энергии ионизации уровня никеля. Во-вторых, изменение концентрации носителей влияет на сопротивление базы:

$$R_b(P) = \frac{l}{S e \mu(P) n(P)} \quad (2)$$

Уменьшение $R_b(P)$ при ВГД приводит к перераспределению приложенного напряжения: большая его часть падает непосредственно на барьере Шоттки. Это создаёт положительную обратную связь, увеличивающую эффективное напряжение на барьере $U_{БШ}$. С учётом этого полный прямой ток через диод может быть представлен в виде:

$$J_{пр} = e \mu n_0 S \frac{U + U_k - \gamma P}{d} \cdot \exp\left(\frac{\alpha_{Ni}P}{kT}\right) \cdot \exp\left(-e \frac{U_k - \gamma P}{kT}\right) \cdot \exp\left(\frac{eU_n}{kT}\right) \quad (3)$$

где γ — барический коэффициент контактной разности потенциалов. Данное выражение интегрирует вклады барического изменения концентрации носителей (через α_{Ni}), сопротивления базы и высоты барьера (через γ).

Предложенная модель позволяет интерпретировать ключевые экспериментальные наблюдения. Увеличение прямого тока при ВГД



объясняется не снижением, а ростом эффективного напряжения на барьере из-за уменьшения падения напряжения на базе. Это согласуется с данными измерений эффекта Холла, показывающими рост концентрации электронов $n(P)$ при практически постоянной подвижности. Рассчитанное значение $\alpha_{Ni} \approx -0.7 \cdot 10^{-11} \text{эВ/Па}$ подтверждает чувствительность глубокого уровня Ni к давлению. Зависимость тензочувствительности от степени компенсации также находит объяснение в рамках модели: с увеличением сопротивления базы в структурах на Si<Ni> относительное изменение прямого тока при ВГД возрастает, так как даже небольшое барическое уменьшение сопротивления приводит к значительному перераспределению напряжения в пользу барьера. Для структур на исходном низкоомном кремнии такой эффект выражен слабо, так как основная часть напряжения изначально падает на барьере.

Заключение

Теоретический анализ показал, что основной механизм тензочувствительности диодов Шоттки на основе компенсированного кремния с глубокими уровнями при всестороннем гидростатическом давлении связан с барически индуцированным изменением концентрации носителей в базе, приводящим к уменьшению её сопротивления и запуску положительной обратной связи по напряжению на барьере. Это объясняет наблюдаемый парадоксальный рост прямого тока несмотря на увеличение высоты потенциального барьера. Установленная зависимость эффекта от степени компенсации материала базы открывает пути для направленного проектирования высокочувствительных тензодатчиков на основе подобных структур. Дальнейшие исследования могут быть сосредоточены на изучении динамики релаксационных процессов и влияния температуры на выявленные механизмы.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. С. С. Горелик, А. М. Михайлов. Тензочувствительность полупроводниковых приборов. М.: Наука, 1978.



2. В. И. Стафеев, К. И. Колесник. Глубокие уровни в кремнии и их влияние на электрофизические свойства. ФТП, 1985, т. 19, вып. 3, с. 417–423.
3. Ю. В. Горячев, Н. Н. Горячев. Влияние всестороннего давления на свойства полупроводников с глубокими уровнями. ПТЭ, 1990, № 4, с. 167–170.
4. А. А. Лебедев, А. Т. Маминов. Барьеры Шоттки на компенсированном кремнии. ФТП, 1988, т. 22, вып. 6, с. 1021–1025.
5. И. П. Степанова, О. В. Рожкова. Тензодатчики на основе структур металл-полупроводник: современное состояние и перспективы. Датчики и системы, 2005, № 3, с. 45–50.