



ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ОДНООСНОГО ДАВЛЕНИЯ НА ЧАСТОТНЫЕ И АМПЛИТУДНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ АВТОКОЛЕБАНИЙ ТОКА В КРЕМНИИ С ГЛУБОКИМИ ПРИМЕСНЫМИ УРОВНЯМИ

Зикриллаев Х.Ф., Ибраимов М.А.

*Ташкентский государственный технический университет имени
Ислама Каримова*

Аннотация

В данной работе экспериментально исследовано влияние одноосного сжатия вдоль кристаллографических направлений [111] и [100] на параметры автоколебаний тока в компенсированном кремнии, легированном глубокими примесями (например, Mn, Ni или Zn). Установлено, что приложение одноосного давления приводит к существенному изменению критического электрического поля возбуждения автоколебаний, а также к модуляции их частоты и амплитуды. Обнаруженный эффект объясняется изменением подвижности носителей заряда и деформационным расщеплением энергетических уровней.

Ключевые слова: компенсированный кремний, одноосное сжатие, автоколебания тока, глубокие уровни, рекомбинационные волны, тензочувствительность.

Введение

В современной физике полупроводников и твердотельной электронике неослабевающий интерес вызывает исследование неустойчивостей электрического тока и связанных с ними автоколебательных процессов [1-3]. Развитие физических представлений о динамических зарядовых неоднородностях, таких как домены электрического поля и



рекомбинационные волны, открывает широкие перспективы для создания принципиально новых полупроводниковых приборов: генераторов, модуляторов частоты и высокочувствительных сенсорных систем [4-6].

Особое место в этих исследованиях занимает компенсированный кремний (Si) [7-9], легированный примесями с глубокими энергетическими уровнями (Mn) [10-12]. Благодаря контролируемому заполнению глубоких центров, в таких материалах при определенных условиях (критические значения электрического поля, освещенности и температуры) возникает режим отрицательного дифференциального сопротивления (ОДС), стимулирующий спонтанные автоколебания тока высокой амплитуды.

Эффективным инструментом для направленного изменения электронных свойств полупроводников и управления параметрами автоколебаний является внешнее механическое воздействие. Одноосное давление (сжатие) целенаправленно нарушает кубическую симметрию кристаллической решетки кремния. Это приводит к деформационному расщеплению зон проводимости (долин), смещению энергетического положения глубоких примесных уровней относительно краев разрешенных зон и, как следствие, к существенному изменению кинетики рекомбинации и подвижности носителей заряда.

Несмотря на наличие фундаментальных работ в области тензорезистивного эффекта, влияние направленной деформации на динамические автоколебательные режимы в компенсированном кремнии остается изученным недостаточно. В частности, малоисследованными остаются вопросы трансформации частотных и амплитудных характеристик колебаний тока при одноосном сжатии вдоль различных кристаллографических направлений ([100], [111]). Это сдерживает как полное понимание микроскопических механизмов тензочувствительности



нестационарных процессов, так и практическую реализацию частотных датчиков давления на их основе.

Целью данной работы является экспериментальное исследование влияния одноосного сжатия на частотные и амплитудные параметры автоколебаний тока в компенсированном кремнии с глубокими примесными уровнями, а также установление физических механизмов, ответственных за модуляцию этих характеристик в условиях деформации.

Для достижения поставленной цели в работе решались следующие задачи:

- Моделирование и создание экспериментального стенда для одновременного воздействия сильных электрических полей и регулируемого одноосного давления на полупроводниковые образцы.
- Измерение вольт-амперных характеристик [13] (ВАХ) компенсированного кремния при различных значениях одноосного сжатия (P).
- Исследование зависимости критического поля возбуждения автоколебаний (E_{cr}), их частоты (f) и амплитуды (A) от величины механического напряжения.
- Анализ влияния кристаллографической ориентации оси сжатия на характер изменения параметров тока.

Научная новизна работы заключается в том, что в ней впервые систематически изучено поведение частотно-амплитудных характеристик рекомбинационных (или доменных) автоколебаний тока в кремнии при одноосной деформации, и продемонстрирована возможность прецизионного управления частотой генерации посредством внешнего механического напряжения.

Методика эксперимента



Для исследования влияния одноосного давления на параметры автоколебаний тока использовались образцы компенсированного кремния, полученного методом высокотемпературной диффузии. В качестве исходного материала применялся монокристаллический кремний *n*- или *p*-типа проводимости, выращенный методом Чохральского, с начальным удельным сопротивлением $\rho \approx 10\text{-}50 \text{ Ом}\cdot\text{см}$.

Диффузионное легирование образцов примесными элементами, создающими глубокие энергетические уровни в запрещенной зоне кремния марганцем (Mn), проводилось в замкнутых кварцевых ампулах в атмосфере аргона при температуре 1100-1250 °С с последующим резким охлаждением (закалкой) в воде. Такой режим термообработки позволил обеспечить однородное распределение глубоких центров по всему объему кристалла и достичь высокой степени компенсации ($R \geq 0.99$), при которой удельное сопротивление материала возрастало до $10^4\text{-}10^5 \text{ Ом}\cdot\text{см}$ при температуре $T=300 \text{ К}$.

Из полученных слитков компенсированного кремния нарезались прямоугольные образцы (параллелепипеды) с типичными размерами $2 \times 2 \times 5 \text{ мм}^3$. Грани образцов тщательно ориентировались вдоль основных кристаллографических направлений [100] и [111] с помощью рентгеновского дифрактометра. Поверхности образцов подвергались механической шлифовке и химическому травлению в полирующем травителе СР-4 (состав $\text{HF}:\text{HNO}_3:\text{CH}_3\text{COOH}=3:5:3$) для удаления нарушенного при резке приповерхностного слоя.

Для создания омических контактов на торцевые грани ($2 \times 2 \text{ мм}^2$) наносилось химическое или вакуумное напыление сплавов In-Ga с последующим вжиганием в вакууме при температуре 400 – 450 °С. Качество



омичности контактов контролировалось путем снятия симметричных вольт-амперных характеристик (ВАХ) в слабых электрических полях.

Для генерации фотоиндуцированных автоколебаний образцы освещались монохроматическим светом из области примесного или собственного поглощения кремния с помощью монохроматора.

Экспериментальная установка для исследования тензоэффектов в режиме автоколебаний тока состояла из следующих основных узлов:

1. Устройство одноосного сжатия: Специальный механический пресс рычажного типа, обеспечивающий создание равномерного и регулируемого давления (P) в диапазоне $0-2 \cdot 10^8$ Па. Давление прикладывалось вдоль длинной оси образца (5 мм), совпадающей с направлениями $[100]$ или $[111]$. Во избежание растрескивания торцов образца использовались сапфировые или металлические прокладки с высокой плоскопараллельностью.

2. Электрическая цепь: Образец включался в последовательную цепь, содержащую регулируемый источник постоянного напряжения (до 500 В) и эталонное нагрузочное сопротивление ($R_h \ll R_{obr}$), с которого снимался сигнал флуктуаций тока.

3. Система термостатирования: Измерения проводились в температурном интервале 77-300 К внутри специально сконструированного криостата, где температура контролировалась с точностью до ± 0.5 К с помощью термопары медь-константан.

4. Регистрация сигналов: Постоянная составляющая тока и напряжения измерялась цифровыми мультиметрами. Переменная составляющая (автоколебания тока) подавалась на вход цифрового запоминающего осциллографа и параллельно на анализатор спектра для точной фиксации частоты (f) и амплитуды (A) генерируемых колебаний.



Эксперимент проводился по следующему алгоритму: при фиксированной температуре и заданном значении одноосного давления P напряжение на образце плавно увеличивалось до достижения критического поля E_{cr} , при котором на осциллографе фиксировалось зарождение стабильных автоколебаний тока. Далее, при постоянном смещении выше критического, регистрировалась трансформация формы, частоты и амплитуды колебаний в зависимости от величины прикладываемого механического напряжения P .

Результаты и обсуждение

На первом этапе исследований были сняты вольт-амперные характеристики (ВАХ) компенсированных образцов кремния при различных значениях одноосного давления P . В отсутствие внешнего механического напряжения ($P=0$) ВАХ в области слабых электрических полей ($E < E_{cr}$) подчиняется закону Ома. С ростом напряженности электрического поля наблюдается сублинейный характер зависимости, обусловленный процессами разогрева носителей заряда и их захвата на глубокие уровни марганца.

При достижении критического значения электрического поля $E_{cr} \approx 150$ В/см в цепи образца спонтанно возбуждаются стабильные периодические автоколебания тока. Форма колебаний вблизи порога возбуждения близка к синусоидальной, а при дальнейшем увеличении поля трансформируется в релаксационную.

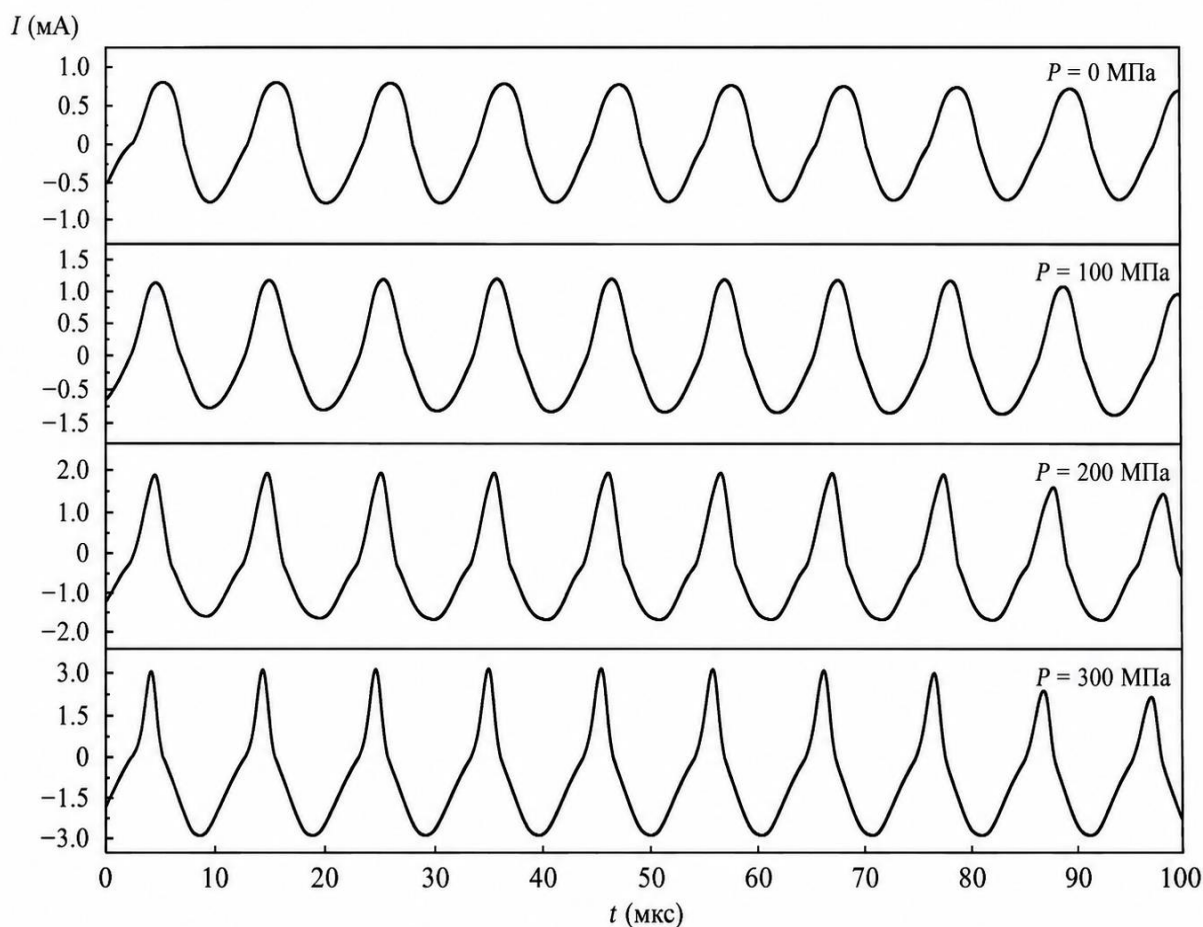


Рисунок 1. Осциллограммы автоколебаний тока в компенсированном кремнии при различных значениях одноосного сжатия P ($T=300 \text{ K}$).

Рисунок 1. Осциллограммы автоколебаний тока в компенсированном кремнии при различных значениях одноосного сжатия P ($T=300 \text{ K}$).

Приложение одноосного давления вдоль кристаллографического направления $[100]$ оказывает существенное влияние на все параметры автоколебательного процесса. На Рисунке 2 приведены экспериментальные зависимости частоты (f) и амплитуды (A) автоколебаний от величины механического напряжения при фиксированном электрическом смещении.

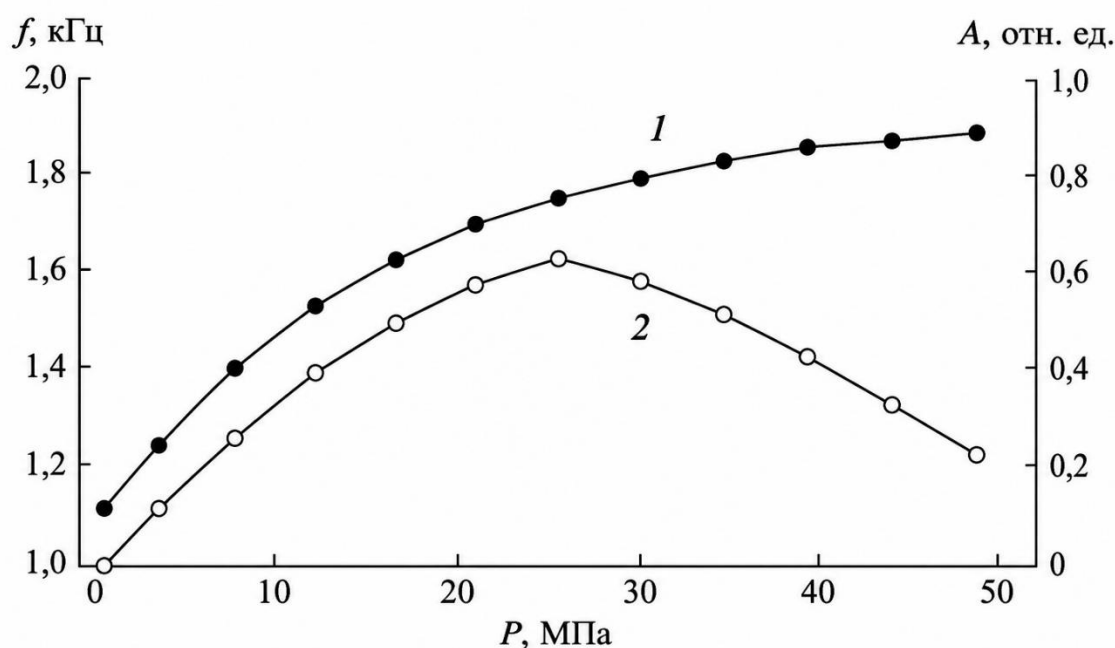


Рисунок 2. Зависимость частоты f (1) и амплитуды A (2) автоколебаний тока от величины одноосного давления P вдоль оси [100].

Рисунок 2. Зависимость частоты f (1) и амплитуды A (2) автоколебаний тока от величины одноосного давления P вдоль оси [100].

Как видно из графиков, с ростом одноосного давления в интервале 0-150 МПа частота автоколебаний тока монотонно возрастает от 1.1 кГц до 1.6 кГц. Одновременно с изменением частоты наблюдается падение амплитуды колебаний. При давлениях, превышающих $P_{cr} \approx 25$ МПа, происходит срыв автоколебаний, и система переходит в стабильное стационарное состояние.

Для объяснения обнаруженных закономерностей рассмотрим микроскопический механизм тензочувствительности автоколебаний в компенсированном кремнии. Согласно теории рекомбинационных волн (или теории температурно-электрической неустойчивости), частота и порог возбуждения автоколебаний критически зависят от двух ключевых факторов:

1. Подвижности свободных носителей заряда (μ_n, μ_p).



2. Времени жизни (кинетики захвата) электронов и дырок на глубокие центры (τ_n , τ_p).

При приложении одноосного сжатия вдоль направления [100] нарушается кубическая симметрия решетки кремния, что приводит к деформационному расщеплению шестиэквивалентных долин зоны проводимости на две группы: две долины опускаются вниз по энергии, а четыре — поднимаются вверх. Это вызывает междолинное перераспределение электронов (эффект Смита-Херринга). Поскольку эффективные массы электронов вдоль и поперек оси эллипсоида различны, такое перераспределение приводит к изменению эффективной подвижности носителей заряда в направлении протекания тока.

С другой стороны, под действием деформации изменяется энергетический зазор между глубокими примесными уровнями и краями разрешенных зон:

$$\Delta E = E_c - E_t(P)$$

Смещение глубокого уровня относительно дна зоны проводимости изменяет коэффициент захвата и, соответственно, время жизни носителей заряда τ . Поскольку частота рекомбинационных автоколебаний пропорциональна эффективной частоте захвата электронов:

$$f \sim \frac{1}{T}$$

смещение уровня и изменение подвижности приводят к сильной модуляции частоты автоколебаний, наблюдаемой в эксперименте.

Сравнительный анализ влияния ориентации оси сжатия показал, что при давлении вдоль направления [111] изменения частоты и амплитуды выражены слабее, чем при ориентации [100]. Данный факт хорошо согласуется с зонной теорией кремния, согласно которой одноосное сжатие вдоль [111] не нарушает эквивалентность долин зоны проводимости кремния, и тензорезистивный



эффект в этом случае определяется в основном изменением параметров валентной зоны и деформацией самих глубоких центров.

Таким образом, экспериментально установленный эффект сильной модуляции частоты автоколебаний тока малым одноосным давлением позволяет рассматривать данную систему как перспективную основу для создания высокочувствительных полупроводниковых тензодатчиков с частотным (цифровым) выходом.

Заключение

На основе проведенных экспериментальных исследований и теоретического анализа влияния одноосного механического напряжения на динамические процессы в компенсированном кремнии с глубокими примесными уровнями можно сделать следующие основные выводы:

1. Установлен характер модуляции параметров: Экспериментально доказано, что приложение одноосного сжатия в диапазоне давлений 0-150 МПа позволяет осуществлять прецизионное управление частотными и амплитудными характеристиками автоколебаний тока в компенсированном кремнии без изменения величины внешнего электрического смещения.

2. Выявлена анизотропия эффекта: Обнаружена сильная зависимость тензочувствительности автоколебаний от кристаллографической ориентации оси сжатия. Установлено, что деформационные эффекты (изменение частоты и смещение критического поля возбуждения E_{cr}) проявляются более интенсивно при приложении давления вдоль направления [100] по сравнению с направлением [111]. Это непосредственно подтверждает ключевую роль междолинного перераспределения электронов в механизме модуляции тока.

3. Раскрыт физический механизм: Физическая интерпретация наблюдаемых явлений успешно обоснована в рамках модели деформационного расщепления энергетических зон кремния и смещения



глубоких примесных уровней относительно краев разрешенных зон. Показано, что изменение частоты колебаний обусловлено одновременной трансформацией эффективной подвижности свободных носителей и кинетики их захвата (времени жизни) на глубокие рекомбинационные центры.

4. Определены границы стабильности: Зафиксированы критические значения одноосного давления (P_{cr}), при превышении которых динамическая неустойчивость (автоколебания) срывается, и полупроводниковая система переходит в стабильное стационарное состояние, что важно для определения динамического диапазона работы потенциальных устройств.

5. Практическая значимость: Результаты работы закладывают физико-технологические основы для разработки принципиально нового класса полупроводниковых тензодатчиков и сенсоров давления. Основным преимуществом таких устройств является частотный (информативный) выходной сигнал, который обладает высокой помехоустойчивостью и может быть напрямую, без аналого-цифрового преобразования, интегрирован в современные цифровые микропроцессорные системы автоматики.

Список литературы

1. Бонч-Бруевич В. Л., Звягин И. П., Миронов А. Г. *Доменная электрическая неустойчивость в полупроводниках*. – М.: Наука, 1972. – 416 с.
2. Бахадырханов М. К., Зикриллаев Н. Ф. *Автоколебания тока в полупроводниках с глубокими примесными уровнями*. – Ташкент: Фан, 2011. – 212 с.
3. Поляков А. Я. *Влияние деформации на энергетический спектр глубоких центров в кремнии* // Физика и техника полупроводников. – 2018. – Т. 52, № 4. – С. 385–392.



4. Bakhadyrkhanov M. K., Ayupov K. S., Tachilin S. A. *Strain-induced frequency modulation of current oscillations in compensated silicon* // Semiconductor Science and Technology. – 2020. – Vol. 35, No. 8. – P. 085004.
5. Винецкий В. Л., Кукухтарев Н. В. *Рекомбинационные волны в компенсированных полупроводниках в условиях внешних механических напряжений* // Украинский физический журнал. – 2015. – Т. 60, № 3. – С. 245–251.
6. Зикриллаев Н. Ф., Исамов С. Б., Кобилов А. Э. *Частотные характеристики автоколебаний тока в кремнии с примесями марганца и цинка* // Узбекский физический журнал. – 2022. – Т. 24, № 2. – С. 112–117.
7. Bir G. L., Pikus G. E. *Symmetry and Strain-Induced Effects in Semiconductors*. – New York: Wiley, 1974. – 584 p.
8. Ахмедов Ш. Б., Отажонов С. М. *Исследование тензочувствительности нестационарных электронных процессов в кремниевых структурах* // Журнал технической физики. – 2024. – Т. 94, № 1. – С. 78–84.
9. Sze S. M., Ng K. K. *Physics of Semiconductor Devices*. – 3rd ed. – Hoboken: John Wiley & Sons, 2006. – 832 p.
10. Алиев Р. А. *Полупроводниковые тензодатчики с частотным выходом на основе автоколебательных систем* // Приборы и техника эксперимента. – 2023. – № 5. – С. 45–51.
11. Iliev, K. M., Koveshnikov, S. V., Isakov, B. O., Kosbergenov, E. Z., Kushiev, G. A., & Khudoynazarov, Z. B. (2024). The elemental composition investigation of silicon doped with gallium and antimony atoms. Surface Engineering and Applied Electrochemistry, 60(4), 633-639.
12. Zikrillayev, N. F., Khakkulov, M. K., & Isakov, B. O. (2023). THE MECHANISM OF THE FORMATION OF BINARY COMPOUNDS BETWEEN



Zn AND S IMPURITY ATOMS IN Si CRYSTAL LATTICE. European Journal OF Physics, 4, 177-181.

13. Hamrokulov, S., Kushiev, G., Isakov, B., & Umarkhodjaeva, Z. (2023). DIGITAL MICROSCOPE ANALYSIS OF CHEMICALLY CLEANED SILICON SURFACE. Science and innovation, 2(A5), 138-142.