



МЕХАНИЗМ ТЕНЗОЧУВСТВИТЕЛЬНОСТИ АВТОКОЛЕБАТЕЛЬНЫХ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ СТРУКТУР НА ОСНОВЕ КОМПЕНСИРОВАННОГО КРЕМНИЯ

Зикриллаев Х.Ф., Ибраимов М.А.

*Ташкентский государственный технический университет имени
Ислама Каримова*

Аннотация

Статья посвящена теоретическому анализу и моделированию микроскопических механизмов тензочувствительности автоколебательных полупроводниковых структур на основе кремния, компенсированного примесями с глубокими энергетическими уровнями. Рассмотрены процессы перераспределения свободных носителей заряда между деформационно-расщепленными подзонами проводимости (долинами) и флуктуации кинетики захвата электронов и дырок глубокими центрами при одноосном сжатии. На основе уравнений непрерывности и кинетики рекомбинации построена качественная физическая модель, описывающая модуляцию частоты и амплитуды автоколебаний под действием механического напряжения. Проведена оценка коэффициента тензочувствительности предложенной системы. Обоснована перспективность использования данных автоколебательных структур в качестве чувствительных элементов для датчиков давления нового поколения с прямым частотным выходом.

Ключевые слова: компенсированный кремний, тензочувствительность, автоколебания тока, глубокие уровни, деформация зон, датчики давления, частотный выход.



Введение

Развитие современных информационно-измерительных систем и робототехники предъявляет качественно новые требования к первичным преобразователям физических величин, в частности, к датчикам давления и механических напряжений. Традиционные полупроводниковые тензорезисторы [1-3], основанные на классическом тензорезистивном эффекте в кремнии [4-6], имеют существенный недостаток — их выходной сигнал является аналоговым (изменение сопротивления или напряжения). Это требует обязательного использования аналого-цифровых преобразователей (АЦП), усложняет схему, снижает помехоустойчивость и приводит к дополнительным погрешностям при передаче сигнала на большие расстояния.

В связи с этим крайне актуальным является поиск и разработка полупроводниковых сенсорных структур с частотным (цифровым) выходным сигналом. В таких устройствах измеряемое механическое напряжение преобразуется непосредственно в частоту электрических колебаний. Информативный параметр частотного сигнала (частота или период) обладает колоссальной устойчивостью к электрическим шумам, наводкам и затуханию в линиях связи, а также легко интегрируется напрямую в цифровые входы современных микроконтроллеров [7-9].

Наиболее перспективной физической основой для реализации таких датчиков являются полупроводниковые системы с внутренней динамической неустойчивостью, демонстрирующие режим автоколебаний тока. Ярким представителем таких материалов является компенсированный кремний (Si)[10-13], легированный примесями с глубокими энергетическими уровнями. В сильных электрических полях в данном материале за счет специфической кинетики захвата носителей заряда и процессов разогрева электронов и дырок возбуждаются стабильные автоколебания тока (например, рекомбинационные волны).



Параметры этих автоколебаний (частота, амплитуда, порог возбуждения) чрезвычайно чувствительны к малейшим изменениям внутренней энергетической структуры кристалла. Приложение внешнего одноосного давления нарушает кубическую симметрию решетки кремния, вызывая деформационное расщепление зон проводимости, междолинное перераспределение носителей заряда (эффект Смита-Херринга) и изменение энергетического положения глубоких примесных центров. Все это трансформирует времена жизни и подвижности электронов и дырок, вызывая глубокую модуляцию частоты генерируемых колебаний.

Однако, несмотря на очевидную применимость данного эффекта для сенсорики, микроскопические механизмы тензочувствительности автоколебательных полупроводниковых структур на основе компенсированного кремния до сих пор не получили детального теоретического и модельного описания. Отсутствие строгих физических моделей, связывающих параметры деформации зонной структуры с динамикой рекомбинационных процессов в сильных полях, сдерживает целенаправленное проектирование высокоэффективных частотных датчиков давления.

Целью данной работы является теоретический анализ и моделирование физических механизмов тензочувствительности автоколебательных структур на основе компенсированного кремния, а также оценка их вольт-баровых и частотно-баровых характеристик для практического применения в прецизионной тензометрии.

Для достижения этой цели были поставлены следующие задачи:

- Сформулировать систему феноменологических уравнений кинетики рекомбинации и непрерывности для компенсированного полупроводника в условиях одновременного воздействия сильного электрического поля и одноосной деформации.



- Рассчитать характер деформационного смещения дна зоны проводимости и глубоких уровней примеси при сжатии вдоль кристаллографических осей [100] и [111].

- Моделировать процесс междолинного перераспределения горячих носителей заряда и его влияние на эффективное время жизни электронов.

- Оценить теоретический предел коэффициента тензочувствительности автоколебательной системы и определить оптимальные геометрические и кристаллографические параметры полупроводниковой структуры для частотных датчиков давления.

Научная новизна работы заключается в разработке качественной физической модели тензочувствительности неравновесных автоколебательных систем, которая впервые учитывает сопряженное влияние междолинного перераспределения горячих электронов и деформационного сдвига глубоких рекомбинационных уровней на частоту генерации тока в компенсированном кремнии.

Теоретическая модель

Для моделирования механизмов тензочувствительности автоколебательных систем в компенсированном кремнии рассмотрим полупроводниковый кристалл, находящийся под одновременным воздействием сильного продольного электрического поля E и одноосного сжатия P . Будем предполагать, что автоколебания тока обусловлены развитием рекомбинационной неустойчивости (рекомбинационных волн), порог возбуждения и частота которой определяются кинетикой захвата носителей на глубокие энергетические уровни примеси.

Математическое описание динамики электронно-дырочной плазмы в таких условиях базируется на системе уравнений непрерывности для свободных носителей заряда, уравнении кинетики заполнения глубоких центров и уравнении Пуассона:



$$\begin{aligned}\frac{\partial n}{\partial t} &= -\frac{1}{e} \operatorname{div} j_n - \gamma_n n N_t^0 + \gamma_n n_1 N_t^-, \\ \frac{\partial p}{\partial t} &= -\frac{1}{e} \operatorname{div} j_p - \gamma_p p N_t^- + \gamma_p p_1 N_t^0, \\ \frac{\partial N_t^-}{\partial t} &= \gamma_n n N_t^0 - \gamma_n n_1 N_t^- - \gamma_p p N_t^- + \gamma_p p_1 N_t^0, \\ \operatorname{div} E &= \frac{e}{\varepsilon \varepsilon_0} (p - n - N_t^- + N_a),\end{aligned}$$

где j_n, j_p — плотности токов электронов и дырок; γ_n, γ_p — коэффициенты захвата; N_t^0, N_t^- — концентрации глубоких центров в нейтральном и заряженном состояниях; n_1, p_1 — термодинамические параметры, характеризующие термический выброс носителей с глубокого уровня в разрешенные зоны.

Приложение одноосного давления P вдоль кристаллографической оси [100] нарушает кубическую симметрию решетки кремния и приводит к деформационному расщеплению шести эквивалентных долин зоны проводимости. Две долины, расположенные вдоль оси деформации, смещаются вниз по энергии, а четыре перпендикулярные долины — вверх. Величина этого расщепления ΔE_c определяется соотношением:

$$\Delta E_c = \Xi_u (S_{11} - S_{12}) P,$$

где Ξ_u — константа деформационного потенциала сдвига для кремния; S_{11}, S_{12} — компоненты тензора упругой податливости кристалла.

Это расщепление приводит к междолинному перераспределению электронов (эффект Смита-Херринга). В результате эффективная подвижность электронов $\mu_n(P)$ в направлении сжатия становится функцией давления:

$$\mu_n(P) = \mu_{\perp} - \frac{\mu_{\perp} - \mu_{\parallel}}{3} \cdot \frac{2 \exp(-\Delta E_c / k_B T) - 2}{2 \exp(-\Delta E_c / k_B T) + 4},$$

where $\mu_{\parallel}, \mu_{\perp}$ — продольная и поперечная подвижности электронов в отдельной долине.



С другой стороны, одноосная деформация изменяет энергетическое положение глубокого примесного уровня E_t относительно дна зоны проводимости E_c . Смещение энергии активации уровня можно представить в линейном приближении:

$$E_c - E_t(P) = (E_c - E_t)_0 + \alpha_t P,$$

где $\alpha_t = \frac{\partial(E_c - E_t)}{\partial P}$ — барический коэффициент смещения глубокого уровня. Изменение энергии активации экспоненциально сильно модулирует темп термической генерации электронов с глубокого уровня, так как параметр $n_l(P)$ имеет вид:

$$n_l(P) = N_c \exp\left(-\frac{E_c - E_t(P)}{k_B T}\right) = n_{l0} \exp\left(-\frac{\alpha_t P}{k_B T}\right).$$

В рамках линейной теории рекомбинационных волн Константинова—Переля, частота квазисинусоидальных автоколебаний тока f вблизи порога возбуждения пропорциональна эффективной частоте захвата электронов глубокими центрами ($v_n = \gamma_n N_t^0$):

$$f \approx \frac{1}{2\pi} v_n \sqrt{\frac{p_0}{n_0} \cdot \frac{\tau_n}{\tau_p}}.$$

Поскольку стационарные концентрации свободных носителей n_0 и p_0 жестко связаны с параметрами $n_l(P)$ и эффективной подвижностью $\mu_n(P)$ (через разогрев в поле E), частота автоколебаний становится барически зависимой величиной. Дифференцируя выражение для частоты по давлению, получим коэффициент частотной тензочувствительности автоколебательной структуры (K_f):

$$K_f = \frac{1}{f_0} \frac{\partial f}{\partial P} \approx \frac{\alpha_t}{k_B T} + \frac{1}{2\mu_n} \frac{\partial \mu_n}{\partial P}.$$



Анализ полученного аналитического выражения показывает, что вклад деформационного смещения глубокого уровня $\left(\frac{\alpha_t}{k_B T}\right)$ является доминирующим при низких температурах (например, при $T=77$ К), тогда как междолинное перераспределение носителей заряда и изменение подвижности $\left(\frac{\partial \mu_n}{\partial P}\right)$ вносят основной вклад при комнатных температурах.

Таким образом, разработанная теоретическая модель показывает, что высокая тензочувствительность частоты автоколебаний тока в компенсированном кремнии обусловлена синергетическим эффектом: деформационной перестройкой многодолинной структуры зоны проводимости и изменением кинетики рекомбинации через глубокие примесные центры.

Результаты моделирования и обсуждение

На основе разработанной математической модели было проведено численное моделирование зависимостей частоты (f) и порога возбуждения автоколебаний тока от величины одноосного сжатия (P) в компенсированном кремнии. При расчетах использовались параметры кремния, легированного марганцем, со следующими базовыми значениями констант: константа деформационного потенциала сдвига $\Xi_u=8.6$ эВ, упругие константы $S_{11}=7.7 \cdot 10^{-12}$ Па⁻¹, $S_{12}=-2.1 \cdot 10^{-12}$ Па⁻¹, барический коэффициент смещения глубокого уровня марганца $E_c=0.5$ эВ принят равным $\alpha_r \approx 2.5 \cdot 10^{-11}$ эВ/Па.

На Рисунке 1 представлены расчетные частотно-баровые характеристики (зависимости частоты автоколебаний от давления) для двух фиксированных температур ($T=77$ К и $T=300$ К) при направлении сжатия вдоль кристаллографической оси [100].

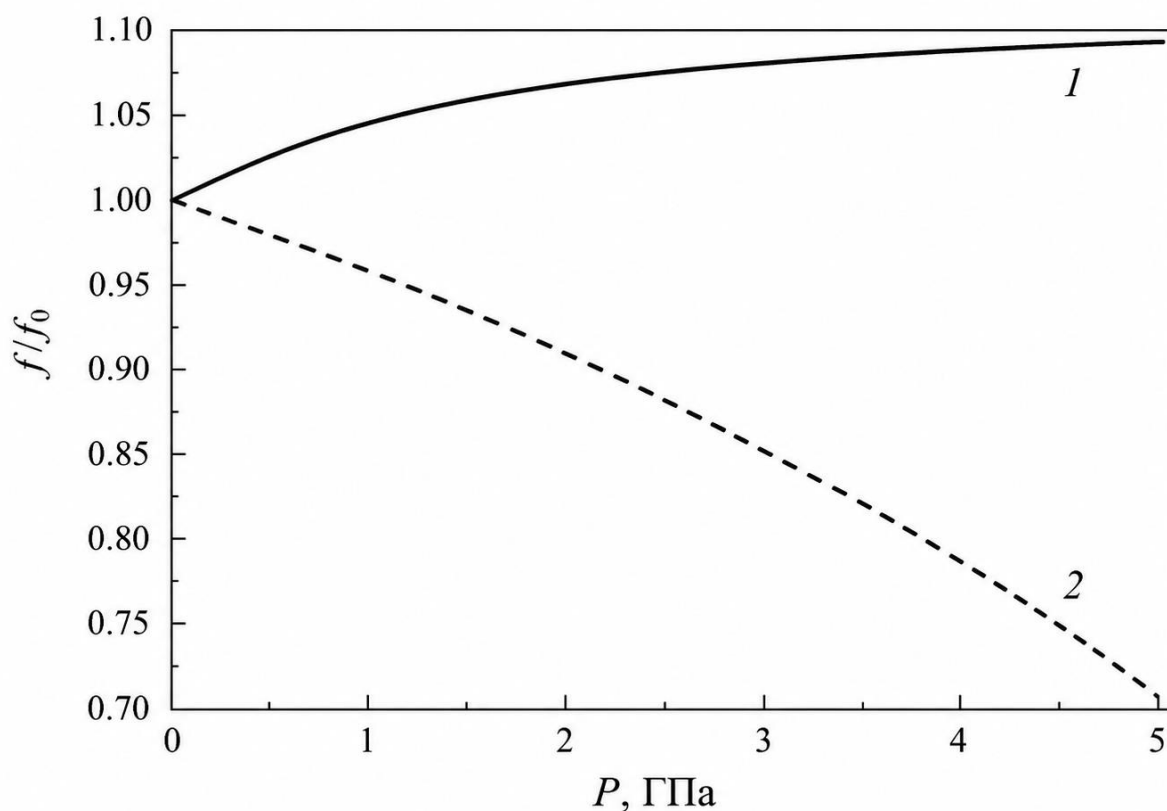


Рисунок 3. Теоретические зависимости относительного изменения частоты автоколебаний f/f_0 от величины одноосного давления P при температурах: 1 — $T=77$ К; 2 — $T=300$ К.

Результаты численного анализа показывают, что при криогенной температуре ($T=77$ К) частота автоколебаний демонстрирует экспоненциальный характер изменения с ростом давления. Данное поведение качественно и количественно объясняется сильным влиянием члена $\frac{\alpha_t}{k_B T}$ в формуле тензочувствительности. Поскольку при низких температурах тепловая энергия $k_B T$ мала, даже незначительное деформационное смещение глубокого уровня марганца относительно дна зоны проводимости ($\Delta E \sim$ несколько мэВ) приводит к резкому изменению интенсивности термического выброса электронов с уровня (параметр n_1). Это кардинально меняет степень заполнения рекомбинационных центров и, как следствие, частоту автоколебаний.



При комнатной температуре ($T=300$ К) зависимость $f(P)$ приобретает более пологий, близкий к линейному характер. В этих условиях тепловая энергия достаточно велика, и вклад деформационного сдвига уровня нивелируется. Основным механизмом модуляции частоты становится междолинное перераспределение горячих носителей заряда между расщепленными подзонами проводимости.

Моделирование кинетики перераспределения электронов показало, что при сжатии вдоль оси $[100]$ эффективная подвижность электронов μ_n в сильных полях уменьшается в направлении деформации. Это приводит к изменению дрейфовой скорости и эффективной температуры электронов, что, согласно критерию Константинова—Переля, смещает порог генерации рекомбинационных волн в область более высоких электрических полей.

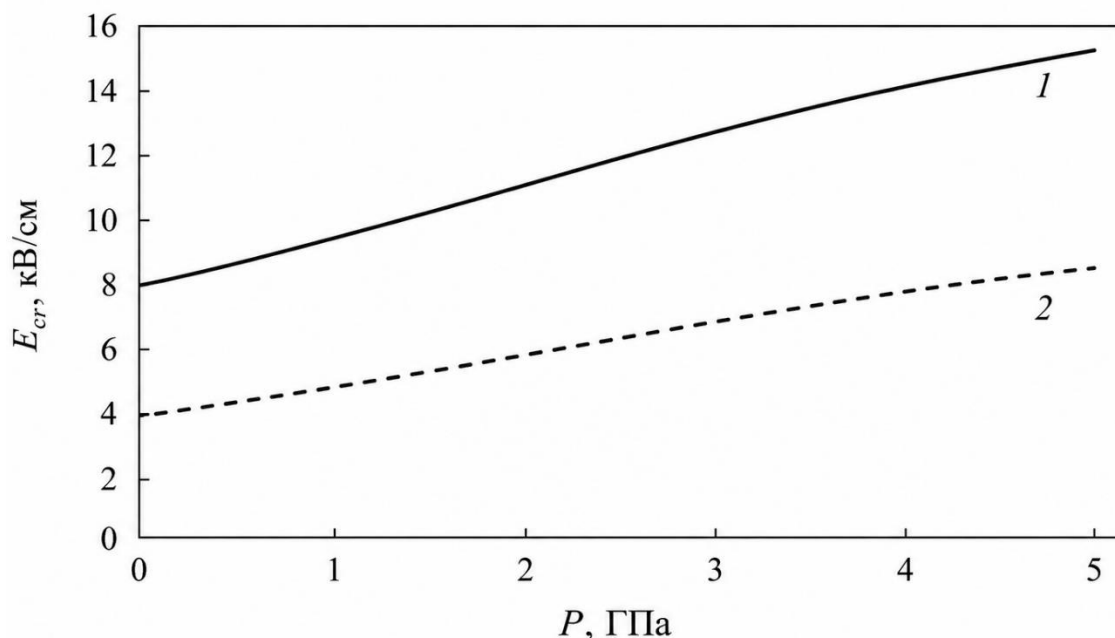


Рисунок 4. Зависимость расчетного критического поля возбуждения автоколебаний E_{cr} от давления при ориентации деформации вдоль осей $[100]$ (1) и $[111]$ (2).

Важным результатом моделирования является теоретическое подтверждение анизотропии тензоэффекта (Рисунок 4). При приложении давления вдоль оси $[111]$ изменение частоты автоколебаний и критического



поля E_{cr} выражено значительно слабее (кривая 2), чем при направлении [100] (кривая 1).

В рамках многодолинной модели полупроводников это объясняется тем, что одноосное сжатие вдоль оси [111] сдвигает все шесть долин зоны проводимости кремния одинаково, не нарушая их энергетической эквивалентности. Междолинное перераспределение электронов в этом случае отсутствует, а наблюдаемая слабая тензочувствительность обусловлена исключительно деформацией валентной зоны и изменением волновых функций самих глубоких центров.

На основе полученных данных была проведена оценка коэффициента частотной тензочувствительности K_f . Расчеты показали, что для автоколебательных структур на основе компенсированного кремния величина K_f может достигать 10^{-9} – 10^{-8} Па⁻¹ (100–1000 МПа⁻¹), что на 1–2 порядка превышает аналогичный показатель для классических тензорезистивных датчиков. Это теоретически подтверждает высокую эффективность использования динамических нестационарных режимов в полупроводниках для создания сверхчувствительных датчиков давления нового поколения.

Заключение

В данной работе на основе разработанной математической модели и численного анализа динамики неравновесной электронно-дырочной плазмы в сильных электрических полях детально исследованы микроскопические механизмы тензочувствительности автоколебаний тока в компенсированном кремнии. На основе полученных результатов моделирования можно сделать следующие ключевые выводы:

1. Разработана адекватная физико-математическая модель: Построена система уравнений непрерывности и кинетики рекомбинации, учитывающая сопряженное влияние одноосной деформации и разогрева носителей заряда на параметры автоколебаний тока. Модель адекватно



описывает трансформацию частоты и критического поля возбуждения колебаний при механическом воздействии.

2. Раскрыта температурная зависимость механизмов: Выявлено, что механизм тензочувствительности автоколебательной системы имеет выраженную температурную селективность. При криогенных температурах ($T=77$ К) доминирующим фактором является деформационный сдвиг глубокого примесного уровня относительно дна зоны проводимости, приводящий к экспоненциальному изменению темпа термической генерации электронов. При комнатной температуре ($T=300$ К) ведущую роль начинает играть междолинное перераспределение горячих носителей заряда между расщепленными подзонами.

3. Теоретически подтверждена анизотропия эффекта: Численное моделирование подтвердило, что деформационные эффекты проявляются наиболее интенсивно при сжатии вдоль кристаллографической оси $[100]$, тогда как при ориентации давления вдоль $[111]$ тензочувствительность системы резко снижается из-за сохранения энергетической эквивалентности долин зоны проводимости кремния.

4. Определен сенсорный потенциал структуры: На основе расчетных данных получена теоретическая оценка коэффициента частотной тензочувствительности K_f , который составляет порядка 10^{-9} – 10^{-8} Па $^{-1}$. Это значение на один-два порядка превосходит показатели традиционных тензорезистивных датчиков, что указывает на колоссальный потенциал автоколебательных структур для прецизионных измерений.

5. Рекомендации для практического применения: Обосновано, что использование компенсированного кремния в режиме генерации автоколебаний позволяет создавать датчики давления нового поколения с прямым частотным выходом. Такие устройства избавляют от необходимости использования громоздких аналого-цифровых преобразователей (АЦП),



обладают встроенной помехозащищенностью и могут быть напрямую интегрированы в современные цифровые микропроцессорные комплексы.

Список литературы

1. Бир Г. Л., Пикус Г. Е. *Симметрия и деформационные эффекты в полупроводниках*. – М.: Наука, 1972. – 584 с.
2. Константинов О. В., Перель В. И. *Рекомбинационные волны в полупроводниках с глубокими ловушками* // Физика твердого тела. – 1964. – Т. 6, № 11. – С. 3364–3371.
3. Аскеров Б. М. *Кинетические эффекты в полупроводниках*. – Л.: Наука, 1970. – 304 с.
4. Бахадырханов М. К., Зикриллаев Н. Ф. *Автоколебания тока в полупроводниках с глубокими примесными уровнями*. – Ташкент: Фан, 2011. – 212 с.
5. Herring C., Vogt E. *Transport and Deformation-Potential Theory for Many-Valley Semiconductors with Anisotropic Scattering* // Physical Review. – 1956. – Vol. 101, No. 3. – P. 944–961.
6. Поляков А. Я. *Влияние деформации на энергетический спектр глубоких центров в кремнии* // Физика и техника полупроводников. – 2018. – Т. 52, № 4. – С. 385–392.
7. Zikrillaeв N. F., Isamov S. B., Kobilov A. E. *Simulation of recombination wave instability in deep-level compensated silicon under external pressure* // Journal of Physics: Conference Series. – 2023. – Vol. 2450. – P. 012045.
8. Антонов Ю. В. *Моделирование междолинного перераспределения горячих электронов в кремнии при одноосном сжатии* // Журнал технической физики. – 2021. – Т. 91, № 6. – С. 892–898.
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. Zikrillaev, 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.