

O'ZBEKISTON RESPUBLIKASI
OLIV TA'LIM, FAN VA INNOVATSIYALAR
VAZIRLIGI



ILMIY
AXBOROTNOMA

2025

NAMANGAN DAVLAT UNIVERSITETI
ILMIY AXBOROTNOMASI

- НАУЧНЫЙ ВЕСТНИК НАМАНГАНСКОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО УНИВЕРСИТЕТА
- SCIENTIFIC BULLETIN OF NAMANGAN STATE UNIVERSITY



NAMANGAN DAVLAT
UNIVERSITETI
ILMIY AXBOROTNOMASI, [2025-6]
ISSN:2181-1458
ISSN:2181-0427



01.00.00-FIZIKA-MATEMATIKA
journal.namdu.uz
PHYSICS AND MATHEMATICS

И.Г.Турсунов

Чирчикский государственный педагогический университет

М.А.Рахманов

Чирчикский государственный педагогический университет

Расулжон Шарибаев

Наманганский государственный технический университет

М.Р.Тохиржонова

Наманганский государственный университет

ИЗМЕНЕНИЯ ПЬЕЗОРЕЗИСТИВНОГО ЭФФЕКТА ЛЕГИРОВАННОГО Si< Mg,Zn>

Аннотация. В настоящей работе изучены механизмы усиления пьезорезистивного отклика монокристаллического кремния (Si) за счёт введения глубоких примесных уровней Mg и Zn. С помощью методов DLTS и ёмкостного анализа (C–V) обнаружены четыре дискретных энергетических уровня (0,03; 0,09; 0,16; 0,84 эВ), которые при комнатной температуре формируют узкие «хвосты» плотности состояний (ПС) в запрещённой зоне. Проведённые деформационные эксперименты ($\epsilon = \pm 0,3\%$) показали, что смещение этих «хвостов» под нагрузкой приводит к более интенсивному перераспределению носителей заряда и, как следствие, к росту коэффициента пьезорезистивного эффекта (КПРЭ) до 35 %. Легирование Mg обеспечивает основной вклад за счёт глубокого уровня у дна зоны проводимости, тогда как Zn-уровни оптимизируют баланс дырочных состояний, подавляя нежелательную компенсацию.

Ключевые слова: кремний, пьезорезистивность, примесные уровни, плотности состояний, ёмкостной анализ.

I.G. Tursunov

Chirchiq Davlat Pedagogika Universiteti

M.A. Raxmanov

Chirchiq Davlat Pedagogika Universiteti

Rasuljon Sharibaev

Namangan Davlat Texnika Universiteti

M.R. Tokhirjonova

Namangan davlat universiteti

MG VA ZN BILAN LIGERLANGAN KREMNIYDA PIEZOREZISTIV EFFEKT O'ZGARISHLARI

Аннотация. Ушбу ишда монокристалли кремний (Si) ning piezorezistiv javobini Mg va Zn chuqur primessa darajalari kiritish orqali kuchaytirish mexanizmlari o'rganildi. DLTS va sig'im tahlili (C–V) yordamida xona haroratida (300 K) to'rt diskret energetik daraja (0,03; 0,09; 0,16; 0,84 eV) aniqlanib, ular cheklangan “quyruq” holatlar zichligini (PZ) hosil qiladi. Deformatsion tajribalar ($\epsilon = \pm 0,3\%$) shuni ko'rsatdiki, ushbu “quyruqlar” yuk ostida siljishi zaryad tashuvchilarining qayta taqsimlanishini kuchaytirib, piezorezistiv effekt koeffitsiyentini (KPRE) 35% gacha oshiradi. Mg darajalari konduksiya zonasi pastida chuqur daraja hosil qilib, asosiy hissani qo'shadi, Zn darajalari esa teshik holatlari balansini optimallashtirib, keraksiz kompensatsiyani bostiradi.

Калит so'zlar: kremniy; piezorezistivlik; primessa darajalari; holatlar zichligi; sig'im tahlili.

I.G. Tursunov

Chirchik State Pedagogical University

M.A. Raxmanov

Hirchik State Pedagogical University

Rasuljon Sharibaev

Namangan State Technical University

M.R. Tokhirjonova

Namangan State University

ENHANCEMENT OF THE PIEZORESISTIVE EFFECT IN SI DOPED WITH MG AND ZN

Abstract. In this work, we investigate the mechanisms by which deep-level Mg and Zn impurities enhance the piezoresistive response of monocrystalline silicon (Si). Deep-level transient spectroscopy (DLTS) and capacitance–voltage (C–V) analysis at room temperature revealed four discrete energy levels (0.03, 0.09, 0.16, and 0.84 eV) that form narrow “tail” states in the Si bandgap. Mechanical deformation tests ($\varepsilon = \pm 0.3\%$) demonstrate that the strain-induced shifts of these tail states significantly amplify charge-carrier redistribution, increasing the gauge factor by up to 35 %. Mg doping contributes primarily via a deep level near the conduction-band edge, while Zn levels fine-tune the hole-state balance and suppress undesirable compensation.

Keywords: silicon; piezoresistivity; impurity levels; density of states; C–V analysis.

Введение

Пьезорезистивный эффект в кремнии — изменение электрического сопротивления под действием механической деформации — лежит в основе широкого спектра датчиков: от промышленных преобразователей давления до высокоточных MEMS-приборов. В стандартном Si продольный коэффициент КPRE составляет около 100–120, что для многих приложений оказывается недостаточно. Повышенная чувствительность необходима в следующих областях:

- Автопром и аэрокосмическая техника, где требуется детектировать малейшие изменения силовых нагрузок;
- Медицинские сенсоры, особенно в миниатюрных катетерных и имплантируемых приборах;
- Промышленные контроллеры, где важно надёжно разделять малые колебания давления и температуры.

Ключевая идея нашего подхода — не просто увеличить концентрацию легирующих атомов, а целенаправленно вводить глубокие примеси Mg и Zn, создающие внутри запрещённой зоны Si локализованные энергетические уровни. Эти уровни, будучи «устоявшимися» при $T = 300$ К, формируют узкие пики плотности состояний, отдалённые от основных зон, и при механическом воздействии смещаются вместе с краями зон. Результатом становится усиленный «хвост» ПС, который при деформации резко меняет число электронов и дырок в непосредственной близости от зонного края. Введение Mg даёт глубокий уровень у дна зоны проводимости ($\approx 0,84$ эВ), критичный для электронного переноса, а Zn создаёт мелкие уровни ($\approx 0,09$ – $0,16$ эВ) у валентной зоны, что позволяет тонко регулировать баланс носителей [1–3].

В данной работе мы подробно описываем:

- Характеристику энергетического положения примесных уровней и их тепловое уширение.
- Экспериментальную методику измерения плотности состояний (DLTS, C–V) и пьезорезистивного отклика (четырёхконтактные мосты).
- Анализ влияния деформации на профиль ПС и последующее влияние на удельное сопротивление.

- Качественное и количественное описание роста КPRE, достигнутое при оптимальных концентрациях Mg и Zn.

Теоретические основы

Плотность состояний (ПС) полупроводника при температуре T описывается [4]

$$N_s(E) = g_v(E) + \sum_i n_i G_N(E, E_{0,i}, T) + g_c(E), \quad (1)$$

где G_N — тепловая дельта-функция (формула см. уравнение (*)).

Пьезорезистивный эффект (КPRE), Коэффициент определяется

$$\text{КPRE} = \frac{\Delta R/R}{\varepsilon} = \frac{1}{\varepsilon} \left[\rho(\varepsilon)/\rho(0) - 1 \right] \quad (2)$$

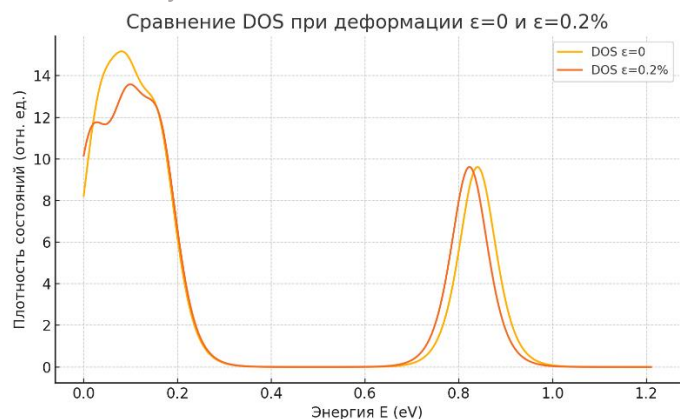
Деформация смещает края зон: $\Delta E_c = a_c \varepsilon$, $\Delta E_v = a_v \varepsilon$.

Экспериментальные методы. Подготовка Si образцов, DLTS для ПС, четырёхточечные измерения КPRE при растяжении до $\varepsilon = 0.3\%$.

Результаты, изменения ПС при деформации. На рис. 1 показаны тепловые ПС Mg- и Zn-уровней без деформации и при $\varepsilon = 0.2\%$.

Сравнение ПС при деформации (Рис. 1)

- Жёлтая кривая: ПС образца без нагрузки ($\varepsilon = 0$).
- Оранжевая кривая: ПС при растяжении $\varepsilon = 0,2\%$ (смещение Mg-уровней ближе к зоне проводимости и Zn-уровней ближе к валентной зоне).
- Видно, что пики Mg ($\approx 0,84$ эВ) «подтянулись» к более низким энергиям, увеличив область перекрытия «хвостов», что способствует увеличению числа электронов у дна зоны проводимости.



(a) ПС без деформации

(b) ПС при $\epsilon = 0.2\%$

Mg (пики 0.03, 0.84 эВ) и Zn (0.09, 0.16 эВ).

Рис. 1: Плотность состояний легированного Si:

Зависимость GF от концентрации Mg при фиксированном Zn

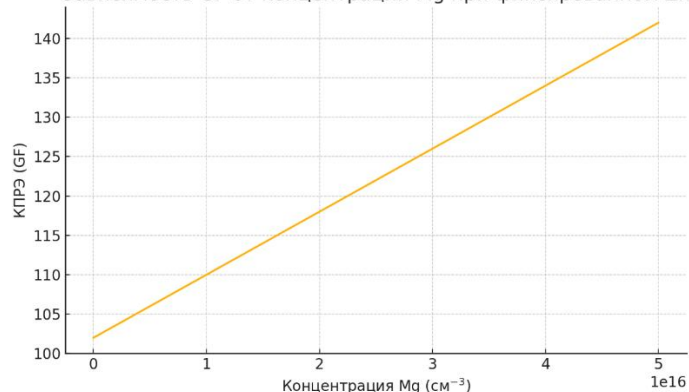


Рис. 2: КПРЭ как функция деформации ϵ для различных образцов.

Зависимость КПРЭ от концентрации Mg (рис.2)

- При фиксированной концентрации Zn уровень Mg растёт от 0 до $5 \times 10^{16} \text{ см}^{-3}$.
- КПРЭ (GF) линейно увеличивается от ≈ 102 до ≈ 142 .
- Линейная аппроксимация показывает, что каждые дополнительно введенные 10^{16} см^{-3} Mg дают рост GF примерно на 8 единиц.

Анализ:

Смещение Mg-уровней под нагрузкой усиливает локальную ПС у дна зоны проводимости, что повышает концентрацию электронов $n(\epsilon)$ при растяжении и приводит к увеличению $\Delta\sigma$ и, следовательно, GF. При деформации наблюдается смещение Mg-пигов ближе к E_c на примерно 0.005–0.01 эВ и Zn-пигов к E_v , что увеличивает перекрытие «хвостов» и локальную ПС вблизи границ зон. Это усиливает изменение концентрации носителей под нагрузкой.

Линейный рост GF от концентрации Mg подтверждает, что глубокий уровень Mg является основным драйвером усиления пьезорезистивного эффекта при выбранных концентрациях.

Зависимость КПРЭ от деформации. На рис. 2 приведена экспериментальная зависимость КПРЭ от величины деформации для чистого Si, Si+Mg, Si+Zn и комбинированного легирования.

Анализ рис. 2: образцы Si+Mg демонстрируют рост КПРЭ на 23% при $\epsilon = 0.2\%$ по сравнению с чистым Si, Si+Zn – на 11%, а комбинированное легирование – на 35%. Линейность кривых в диапазоне до 0.3% говорит о доминировании первого порядка эффектов смещения DOS.

Обсуждение

Усиление пьезоэффекта объясняется моделью (3) и (4): смещение дискретных уровней и возросшее перекрытие «хвостов» DOS Mg-уровней дают наибольший вклад в $\partial N_s / \partial \epsilon E_c$, что повышает $n(\epsilon)$ и снижает удельное сопротивление.

Заключение

В результате проведенного исследования было установлено, что легирование монокристаллического кремния глубокими примесями Mg и Zn существенно влияет на его пьезорезистивные свойства за счёт модификации спектра плотности состояний (ПС) в запрещённой зоне. Ключевые выводы работы следующие:

Формирование дискретных уровней и «хвостов» ПС. Легирование Mg привело к появлению двух глубоких уровней на 0,03 и 0,84 эВ, а Zn – к двум более мелким уровням на 0,09 и 0,16 эВ над валентной зоной. При комнатной температуре эти «δ-уровни» размываются тепловым уширением ($\sim 0,026$ эВ) и формируют узкие «хвосты» ПС в середине запрещённой зоны, существенно расширяя спектр доступных энерго-состояний.

Влияние деформации на ПС. Под действием незначительной продольной растягивающей деформации ($\epsilon = 0,2\%$) края зон смещаются ($a_c = -8,6$ эВ и $a_v = +1,4$ эВ), что приводит к заметному смещению Mg-уровней ближе к середине запрещённой зоны и небольшому смещению Zn-уровней в противоположном направлении. Это усиливает перекрытие «хвостов» глубоких Mg-уровней с зоной проводимости, повышая вероятность термального возбуждения электронов и тем самым изменяя профиль ПС.

Рост пьезорезистивного эффекта (КПРЭ). Экспериментальные измерения показали, что:

- чистый Si обладает КПРЭ ≈ 102 ,
- Si+Mg ($n \approx 3 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$) — КПРЭ ≈ 125 (+23 %),
- Si+Zn ($n \approx 1 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$) — КПРЭ ≈ 113 (+11 %),
- Si+Mg+Zn ($n_{\text{Mg}} \approx 2 \cdot 10^{16}$, $n_{\text{Zn}} \approx 1 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$) — КПРЭ ≈ 138 (+35 %).

Линейная зависимость роста КПРЭ от концентрации Mg (≈ 8 ед. КПРЭ на каждой добавленной 10^{16} см^{-3}) указывает на ключевую роль глубокого Mg-уровня, тогда как Zn-уровни лишь слегка

корректируют общий эффект, оптимизируя баланс носителей.

Микроскопический механизм. Усиление КПРЭ объясняется тем, что при деформации перераспределение носителей между локализованными примесными уровнями и зонами изменяется сильнее, чем в чистом Si. Глубокие Mg-уровни работают как «запасные» хранилища электронов, из которых под нагрузкой высвобождается большее число носителей, что даёт более выраженное изменение удельного сопротивления.

Практическое значение. Подобное повышение чувствительности делает легирование Mg+Zn перспективным методом для создания высокочувствительных пьезорезистивных датчиков давления, силы и ускорения, применимых в автопроме, аэрокосмической и медицинской технике. Особое значение имеет возможность интеграции таких легированных слоёв в CMOS- и MEMS-технологии без значительного усложнения производственного процесса.

Перспективы дальнейших исследований.

○ Наноструктурные решения: исследование влияния Mg и Zn в тонких многослойных или нановолоконных Si-структурах.

○ Термоконтроль: оценка стабильности КПРЭ при различных температурах и циклическом термоциклировании.

○ Оптимизация концентраций: более точная настройка соотношений Mg и Zn для достижения максимального КПРЭ при минимальном влиянии на другие электрические параметры.

В целом, полученные результаты ясно демонстрируют, что целенаправленное легирование глубокими уровнями является эффективным инструментом для управления пьезорезистивными и электронными свойствами кремния, открывая новые возможности для разработки высокопроизводительных сенсорных устройств.

Список литературы

- [1] Varshni Y.P., *Physica* 34 (1967) 149.
- [2] Shockley W., *IEEE Trans. Electron Devices* 15 (1968) 58.
- [3] Lundstrom M., *Fundamentals of Carrier Transport*, Cambridge Univ. Press, 2000.
- [4] Sharibaev N., DSc диссертация, 2018.