

**ВСЕРОССИЙСКИЙ НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ  
ИНСТИТУТ АВТОМАТИКИ ИМ. Н.Л.ДУХОВА**

**ПРЕДПРИЯТИЕ ГОСКОРПОРАЦИИ «РОСАТОМ»**



**СБОРНИК ДОКЛАДОВ**

**VIII научно-технической конференции  
молодых ученых**

**«ВНИИА-2014»**

**7-25 апреля 2014 г,  
ВНИИА им. Н.Л.Духова,  
Москва**

**ИССЛЕДОВАНИЕ ЯВЛЕНИЕ ТЕНЗОЭФФЕКТА  
НА БИПОЛЯРНОМ ТРАНЗИСТОРЕ.  
ПОСТРОЕНИЕ ЧУВСТВИТЕЛЬНОГО ЭЛЕМЕНТА  
НА БАЗЕ СОСТАВНОГО ТРАНЗИСТОРА В ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНОЙ СХЕМЕ**

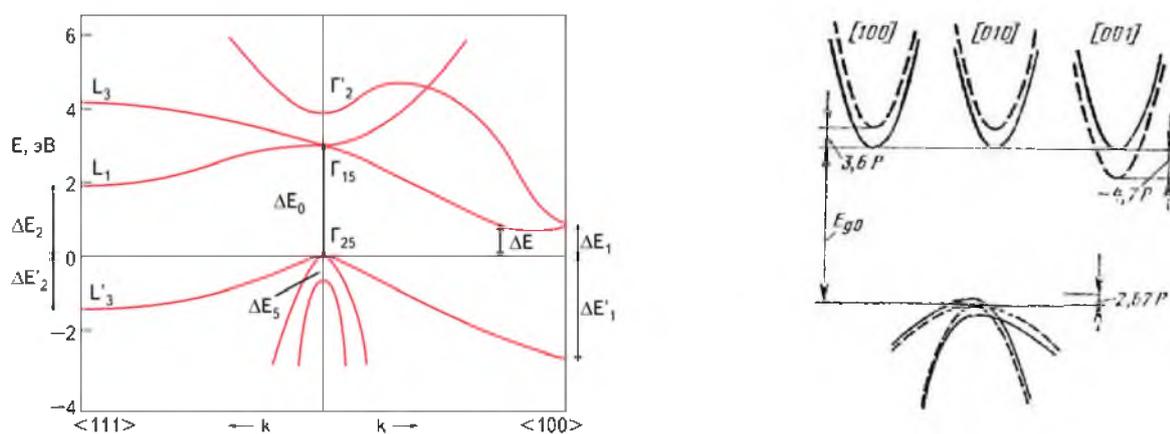
*Басов М.В. (подр. 522)*

**Аннотация**

Работа посвящена исследованию физических свойств тензоэффекта на биполярном транзисторе (БТ), используемого в качестве сенсора тензодатчика. Основываясь на теоретических законах, связанных с зависимостью электрического сигнала под действием давления на датчик мембранного типа, проводилась оценочное моделирование активного элемента. В качестве оптимальной схемы для ЧЭ - дифференциальный каскад. Выходным сигналом ЧЭ является разница напряжений  $U_k$  двух транзисторов, находящихся на противоположных по знаку напряжениях и деформаций областей мембраны. Данная структура имеет чувствительность на порядок выше, чем в случае мостовой тензорезистивной схемы.

Для исследования эффекта необходимо было выполнить следующие этапы: изучение физики тензоэффекта; моделирование чувствительного элемента (ЧЭ); проектировка эскизов топологии кристалла датчика давления (КДД); практическое подтверждение.

Кремниевый полупроводниковый (п/п) кристалл обладает кубической симметрией и является анизотропным материалом. При деформации происходит нарушение симметрии и изменение свойств Si в различных кристаллографических направлениях (КГН) по разным законам. Деформация приводит к значимому изменению: энергетической зонной структуры (ЗС) п/п и, как следствие, других электрических параметров. Далее экспериментальные и теоретические выводы, без формульного доказательства. Рассмотрим эффект на транзисторе по общим законам для п/п.



**Рис. 1. а) Зонная структура Si; б) Положение зон в Si без деформации (сплошная) и при сжатии по [001] (пунктир).**

В Si зона проводимости (ЗП) имеет 3 типа минимумов ( $\Gamma_2$ , набор  $\Delta_1$  и набор  $L_1$ ); валентная зона (ВЗ) имеет единый максимум (вершина двукратно вырожденная по энергии) и ветвь от спин-орбитального взаимодействия (изоб.1 а). Поэтому Si считается многодолинной структурой. Под действием деформации ( $\epsilon_{ij}$  – тензор деформации 2-го ранга) в определенном

КГН энергия разных минимумов ЗП  $\Delta E_c(\varepsilon_{ij})$  может как понижаться, так и повышаться (а также в зависимости от давления может меняться знак  $\Delta E_c$ ) – это и является основной причиной изменения подвижности. Максимумы ВЗ  $\Delta E_v(\varepsilon_{ij})$  при изотропной деформации смещаются как целые и при анизотропной – расщепляются на зоны, что приводит к разделению на «легкие» и «тяжелые» дырки (изоб. 1 б).

$$\Delta E_{cj}(\varepsilon_{ij}) = \theta_d \cdot \Delta + \theta_u \cdot \varepsilon_{ij}, \quad (1)$$

$$\Delta E_{vj}(\varepsilon_{ij}) = a \cdot \Delta \pm \sqrt{\varepsilon_{\varepsilon j}}, \quad (2)$$

где  $\theta_{d,u}$  и  $a$  – константы деформированного потенциала для ЗП и ВЗ соответственно,  $\varepsilon_{\varepsilon}$  – коэффициент тензора деформации и  $\Delta$  – изменение объема при деформации.

**Таблица 1. Изменение  $\Delta E_g(\varepsilon_{ij})$  при различных видах однородных деформаций.**

Деформация	Направление действия силы	$\Delta E_g \cdot 10^{-11}$ , эВ/Па
Всестороннее сжатие	-	-1.5
Простое сжатие (растяжение)	[001]	-7.39 (-3.57)
Простое сжатие (растяжение)	[111]	-4.47 (-3.40)
Простое сжатие (растяжение)	[110]	-2.08 (-6.68)
Одностороннее сжатие (растяжение)	[001]	-5.18 (-4.68)
Одностороннее сжатие (растяжение)	[111]	-3.78 (-2.31)

Смещение запрещенной зоны (ЗЗ)  $\Delta E_g(\varepsilon_{ij})$  – это разница между смещенными экстремумами: минимальным для ЗП и максимальным для ВЗ. В Si имеет отличие от других п/п в том, что при любой однородной деформации  $\Delta E_g(\varepsilon_{ij})$  уменьшается, если рассматривать работу с кремнием, как единым п\п без движение носителей в каком-либо определенном направлении (табл. 1). Выводом по изменению уровня Ферми (УФ) является:

$$\Delta E_F(\varepsilon_{ij}) = \frac{1}{N} \cdot \sum_{j=1}^N \Delta E_{cj}(\varepsilon_{ij}), \text{ для n-Si} \quad (3)$$

$$\Delta E_F(\varepsilon_{ij}) = 0, \text{ для p-Si} \quad (4)$$

$N$  – это количество долин, равное, например, 6 для минимумов  $\Delta_1$ .

Зависимость  $\Delta E_t(\varepsilon_{ij})$  для каждой примеси в Si имеет свои особенности. В случае многодолинной ЗС смещение примесных уровней (ПУ)  $\Delta E_t(\varepsilon_{ij})$ , расположенных вблизи ВЗ, происходит подобно смещению края ВЗ  $\Delta E_v(\varepsilon_{ij})$ , но со скоростью смещения на 2 порядка ниже, чем у края ВЗ. Изменение ПУ  $\Delta E_t(\varepsilon_{ij})$ , расположенных далеко от обеих зон, имеет сложную зависимость и их скорость выше, чем у близко расположенных ПУ. В среднем для оценок можно считать  $\Delta E_t(\varepsilon_{ij}) \approx 0,5 \cdot \Delta E_g(\varepsilon_{ij})$ .

Зависимость эффективных масс  $\Delta m_n^*(\epsilon_{ij})$  для электронов в Si несет слабый характер. Изменение же подвижности электронов  $\Delta \mu_n(\epsilon_{ij})$  при этом учитывается и имеет вид:

$$\mu_n(\epsilon_{ij}) = \frac{n_k \mu_{||} \exp\left(-\frac{\Delta E_k}{kT}\right) + n_j \mu_{\perp} \exp\left(-\frac{\Delta E_j}{kT}\right)}{\sum_{i=1}^N \exp\left(-\frac{\Delta E_i}{kT}\right)}, \quad (5)$$

где  $\Delta E_k$  и  $\Delta E_j$ ,  $\mu_{||}$  и  $\mu_{\perp}$  – изменения дна ЗП и подвижности электронов в долине направленной одноосной деформации и долин, имеющих общей с ней минимум, соответственно.

В случае для дырок эффективная масса практически не зависит от абсолютной величины деформации, а определяется только КГН. Из-за расщепления ВЗ, было выявлено нелинейное изменение напряжения  $\Delta E(\epsilon_{ij})$  и как следствие зависимость  $\Delta m_p^*(\epsilon_{ij})$ .

$$\frac{\hbar^2}{2m_{ii}^*(\epsilon_{ij})} = A \pm \frac{B}{3\sqrt{\epsilon_{\epsilon}}} \cdot (3 \cdot \epsilon_{ii}'' - \Delta), \quad (6)$$

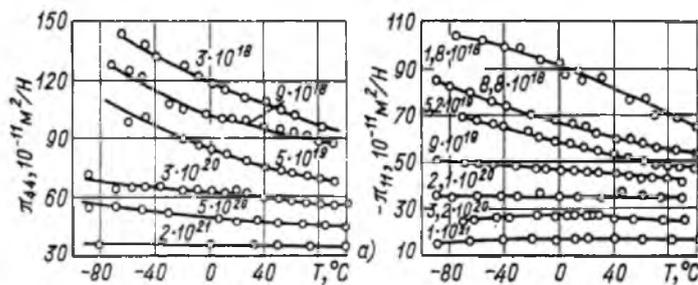
где  $\epsilon_{ii}$  – компоненты приведенного тензора деформации  $\epsilon_{ij}$  в его главных осях,  $m_{ii}^*$  – общее обозначение для двух эффективных масс  $m_{||}$  и  $m_{\perp}$ , характеризующие массу дырки в направлении большой и малой осей эллипсоида равной энергии, А и В – параметры ВЗ, характеризующие эффективные массы дырок.

Для изменения подвижности электронов  $\Delta \mu_p(\epsilon_{ij})$  учитывается отдельное влияние  $\Delta m_{p(\text{тяж})}^*(\epsilon_{ij})$  и  $\Delta m_{p(\text{лег})}^*(\epsilon_{ij})$ :

$$\mu_p(\epsilon_{ij}) = \frac{m_{\text{л}}^{1/2}}{(m_{\text{л}} + m_{\text{т}})^{3/2}} \cdot \frac{1 + \left(\frac{m_{\text{л}}}{m_{\text{т}}}\right)^{1/2} \cdot K'^{1/2} \cdot \exp\left(\frac{\Delta E_{v1} - \Delta E_{v2}}{kT}\right)}{1 + K'^{1/2} \cdot \exp\left(\frac{\Delta E_{v1} - \Delta E_{v2}}{kT}\right)}, \quad (7)$$

где  $K' = m_{\text{л}}/m_{\text{т}}$  – отношение эффективных масс верхней и нижней расщепившейся зоны,  $\Delta E_{v1} - \Delta E_{v2}$  – расщепление вершины ВЗ.

Направленное движение тока смещается под действием деформации, т.е. образуется дополнительный поперечный вектор к начальному полю в зависимости от КГН, т.к. при деформации неосновным носителям заряда (а это особенно эффективно в случае электронов) открывается возможность перейти в другие КГН из-за меньше ширины ЗЗ  $\Delta E_g$ , учитывая также и смещение примесных центров. Считается, что при малых давлениях (наш случай) для многодолинной структуры  $\Delta \mu_n(\epsilon_{ij})$  связана с пьезорезистивными коэффициентами  $\pi_{ij}$ , которые представлены в учебнике «голыми» коэффициентами без обоснования выбора (изоб. 2).



**Рис. 2. Зависимость от температуры и поверхностной концентрации примеси главных пьезорезистивных коэффициентов: а)  $\pi_{44}$  диффузионных слоев кремния р-типа проводимости, б)  $\pi_{11}$  п-типа проводимости**

Обычно считают изменение времени жизни носителей тока  $\Delta\tau_{n,p}(\varepsilon_{ij})$  незначительным в материалах с достаточно большой степенью легирования. Если рассматривать промежуточный вариант между сильнолегированным п/п и приближенным к собственному, то:

$$\frac{d\tau_{p,n}(\varepsilon_{ij})}{d\varepsilon} = -\frac{1}{kT} \cdot \tau_{p0,n0} \cdot \exp\left(-\frac{\chi}{kT}\right) \frac{d\chi}{d\varepsilon}, \quad (8)$$

где  $\chi = E_t - E_i$ ,  $E_t$  – уровень энергии ловушки,  $\tau_{p0,n0}$  – время жизни для сильнолегированного п/п n- и p-Si, соответственно.

Изменение концентрации неосновных носителей  $\Delta n_p(\varepsilon_{ij})$  в p-Si и  $\Delta p_n(\varepsilon_{ij})$  в n-Si проходит (подобно  $\Delta E_g(\varepsilon_{ij})$ ) только в положительный рост и, например, в n-Si при  $P > 5 \cdot 10^9$  Па по одноосной деформации [001] получаем  $n_i \ll N_D$ . В вырожденных п/п  $\Delta n_p(\varepsilon_{ij})$  для p-Si и  $\Delta p_n(\varepsilon_{ij})$  для n-Si гораздо меньше, чем в невырожденных. Всегда выполняется соотношение:

$$\frac{n_p(\varepsilon_{ij})}{n_{p0}} = \frac{p_n(\varepsilon_{ij})}{p_{n0}} = \frac{1}{N} \cdot \sum_{j=1,2} \sum_{i=1}^N \left(\frac{m_j}{m_v}\right)^{3/2} \cdot \exp\left(\frac{\Delta E_{vj} - \Delta E_{ci}}{kT}\right), \quad (9)$$

где  $n_{p0}$  и  $p_{n0}$  при  $\varepsilon_{ij}=0$  и  $n_{p0}$  и  $p_{n0}$  при  $\varepsilon_{ij} \neq 0$ . Данный эффект вносит значимый вклад при больших деформациях. В случае вырожденного п/п изменение концентрации неосновных носителей существенно ниже изменения концентрации в невырожденном п/п и её фактически можно не учитывать. Т.о. с увеличением легирующей примеси в п/п уменьшается тензоэффект.

Как вывод можно определить влияния деформации на ВАХ p-n перехода. Расчет диффузионного тока произведен без учета генерации и рекомбинации носителей.

$$\frac{J_{e,p}(\varepsilon_{ij})}{J_{0 e,p}} = \left(\frac{\mu_{n,p} \cdot \tau_{n0,p0}}{\mu_{n0,p0} \cdot \tau_{n,p}}\right)^{1/2} \cdot \frac{1}{N} \cdot \sum_{j=1,2} \sum_{i=1}^N \left(\frac{m_{j,i}}{m_{v,c}}\right)^{3/2} \cdot \exp\left(\frac{\Delta E_{vj} - \Delta E_{ci}}{kT}\right). \quad (10)$$

При малых деформациях экспоненциальные множители приближенно равны 1 и основной вклад вносят  $\Delta\mu(\varepsilon_{ij})$  и  $\Delta\tau(\varepsilon_{ij})$ .

На самом деле генерация и рекомбинация носителей в Si вносит значительный вклад в ток диода  $J_{\text{диода}} = J_d + J_{gr}$ . При положительных напряжениях (в условиях  $eU \gg kT$ ) изменение плотность тока  $\Delta J_{gr}(\Delta\varepsilon_{ij})$ :

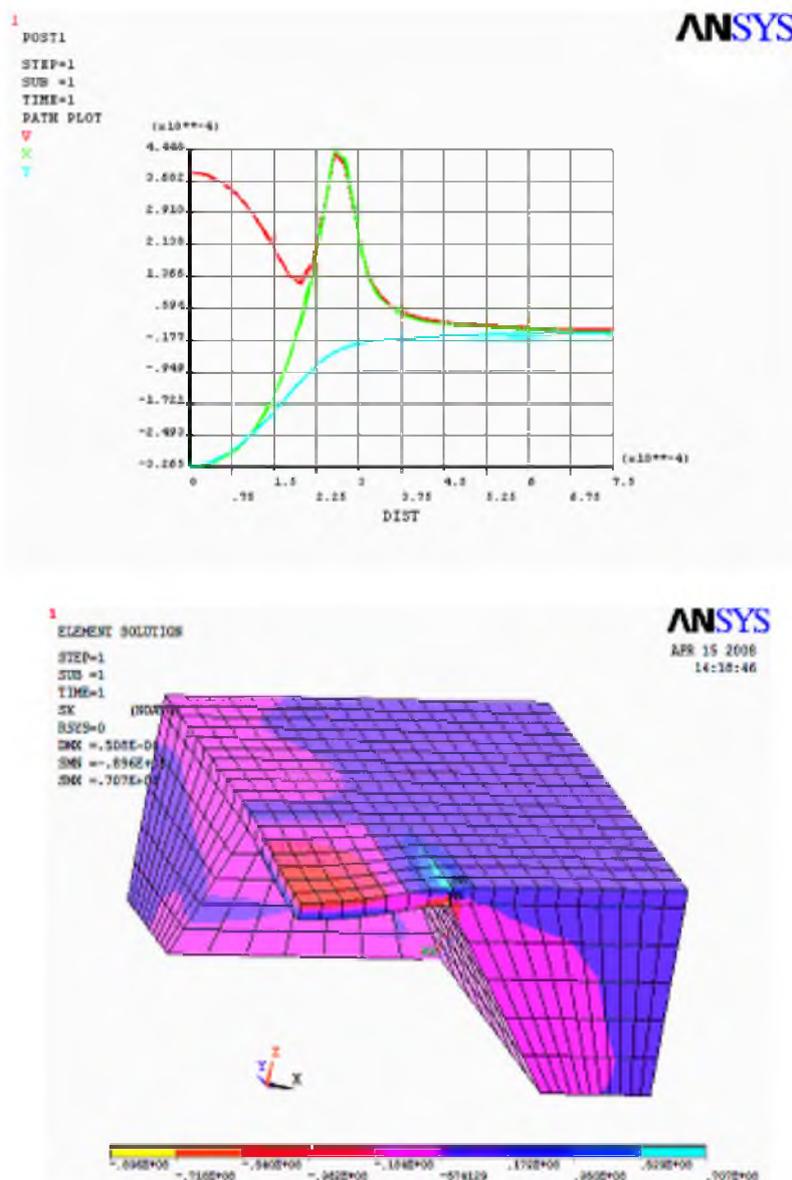
$$J_{gr}(\varepsilon_{ij}) = \frac{e \cdot n_i \cdot L}{\sqrt{\tau_n \cdot \tau_p}} \cdot \frac{kT}{\varphi - eU} \cdot \exp\left(\frac{eU}{2kT}\right), \quad (11)$$

где  $L$  – ширина p-n перехода. Диффузионный ток и ток генерации и рекомбинации имеют зависимости  $J_d$  от  $n_i^2$  и  $J_{gr}$  от  $n_i$  при деформации, поэтому  $J_d$  будет иметь больший вклад в общей составляющей тока с ростом большого давления, при малом давлении эффект не значителен, но имеется.

Формулируя вывод теоретических исследований для конкретной рабочей модели (при малых деформациях), можно сказать, что тензоэффект на биполярном транзисторе будет основываться на двух принципах: 1)анизотропия подвижности  $\Delta\mu(\Delta P)$  из-за изменения ЗС по разным КГН 2)изменение абсолютного значения подвижности неосновных носителей в базе  $\Delta\mu(\Delta P)$  и, как следствие, тока коллектора  $\Delta I_k(\Delta P)$ . В работе была проведена проверка второго принципа, который является основным физическим свойством работы построенного тензотранзистора. С целью доказательства существования анизотропии подвижности в разных КГН

$\Delta\mu(\Delta P)$ , следующим этапом будущей работы будет проведено практическое доказательство описанной теории.

Выходным сигналом  $U_{\text{вых}}(P)$  (конструкции для проверки изменения тока коллектора  $\Delta I_k(\Delta P)$ ), зависящим от деформации, является разница изменений напряжения на коллекторах ЧЭ двух тензотранзисторов  $\Delta U_k(\Delta P) = \Delta U_{k1}(\Delta P) - \Delta U_{k2}(\Delta P)$ . Разница изменений  $\Delta U_{ki}(\Delta P)$  является не нулевой по причине несимметричного расположения ЧЭ на мембранной части, а также из-за расположения в разных КГН или сочетания этих свойств одновременно. Пример произвольного случая распределения тензора напряжения  $\sigma_{km}$  по планарной поверхности в направлении X (изоб. 3 а) и объему (изоб. 3 б) кристалла с  $S_{\text{кр}} = 1,5 \times 1,5 \text{ mm}^2$ ,  $W_{\text{кр}} = 400 \mu\text{m}$ ,  $S_{\text{мемб}} = 0,52 \times 0,52 \text{ mm}^2$ ,  $W_{\text{мемб}} = 30 \mu\text{m}$  и с ориентацией подложки (100) при подачи давления со стороны тензосхемы. Связь между напряжениями и деформациями в анизотропном теле:  $\sigma_{km} = c_{ijkl} \varepsilon_{ij}$ , где  $c_{ijkl}$  – модуль упругости. Видно, что в подобных образцах мембранного типа, при подаче сжатого воздуха со стороны тензосхемы происходит сжатие кремниевой структуры в геометрическом центре тонкого слоя кремния и растяжение по краям тонкого слоя кремния.

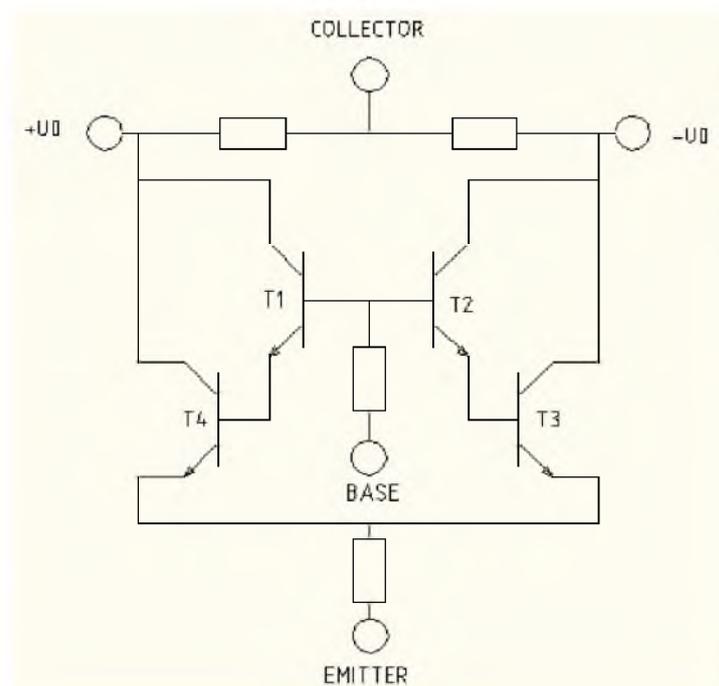


**Рис. 3. Распределение тензора напряжения в кристалле мембранного типа по: а) планарной поверхности в направлении X, относительно точки симметрии центра кристалла; б) объему кристалла.**

Условия на БТ:

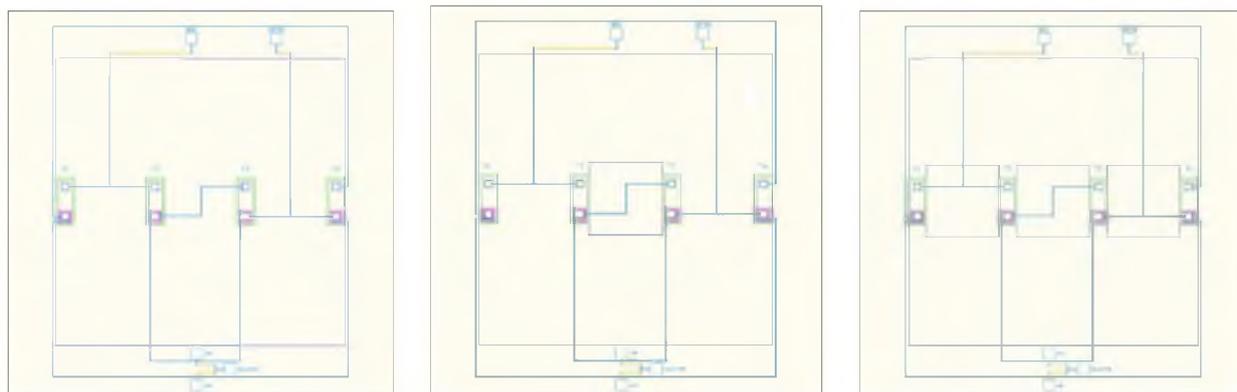
2. Была выбрана схема включения БТ с общим эмиттером (ОЭ), т.к. имеет коэффициент усиления по току  $\beta$  выше остальных схем.
3. Возможно использовать как горизонтальный, так и вертикальный БТ любой структуры: n-p-n либо p-n-p. Тензоэффект будет во всех случаях, только в каждом в определенной силе.
4. Большая чувствительность достигается за счет достаточно мелкой ширины базы  $W_{\text{базы}}$ , т.е. БТ с большим коэффициентом усиления.
5. Эффективнее было бы использовать БТ с базовой областью, в которой уровень легирования примеси был сравним с собственной концентрацией в кремнии ( $\approx 10^{10} \text{ см}^{-3}$ ), т.к. тензоэффект гораздо выше в невырожденных п\п из-за изменения концентрации неосновных носителей.
6. Если учитывать пункт 4, то также эффективнее было бы использовать в качестве неосновных носителей – электроны. Т.к. изменение подвижности электронов несет одинаковый характер с изменением концентрации (в отличие от дырок).

Кристалл с ЧЭ – это кремниевая подложка определенной ориентацией с вытравленной с обратной от планарной части профилированной мембранной. Мембрана может иметь разную толщину, площадь и количество жестких центров (ЖЦ). На планарной части расположена электрическая схема, представленная в виде дифференциального каскада (ДК), в плечах которого создан составной транзистор (изоб. 4) и расположены плечи ДК в областях разных простых одноосных деформаций кристалла мембранного типа и/или с разными расположениями в КГН. Рассматривая конкретную область работы ЧЭ и основываясь на вышеописанной теории, можно сказать, что во время подачи давления изменяется абсолютное значение подвижности и, как следствие, протекающий ток неосновных носителей в базе из эмиттера в коллектор. Результатом служит изменение тока коллектора  $\Delta I_k(\Delta P)$  и в каждой области изменение происходит по разному в зависимости от деформации и КГН.



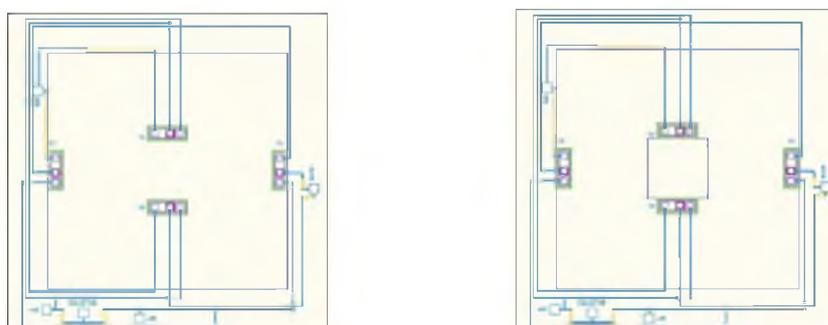
**Рис. 4. Электрическая схема дифференциального каскада с составными транзисторами в плечах схемы.**

Для поиска подходящего топологического рисунка были спроектированы следующие конструкции ЧЭ:



а) **Топология ЧЭ без жестких центров (ЖЦ); б) Топология ЧЭ с одним ЖЦ; в) Топология ЧЭ с 3 ЖЦ.**

Для изображения 5 (а, б, в) использовалась стандартная конструкция, к примеру, горизонтального БТ для проверки изменения тока. При топологии рисунка четыре БТ расположены в параллель и разбаланс в ДК происходит только за счет разности напряжений на мембранной части. Различие количества ЖЦ играет положительную роль для одних параметров (к примеру, чем больше ЖЦ, тем чувствительность выше) и отрицательную для других (например, разбаланс при температурных характеристиках). Асимметричный рисунок металлизации, расположенный на мембранной части, вносит дополнительные коррективы в разбаланс системы, но это можно считать как внутреннюю ошибку, входящую в изменение выходного сигнала  $\Delta U_{\text{вых}}(\Delta P)$ .

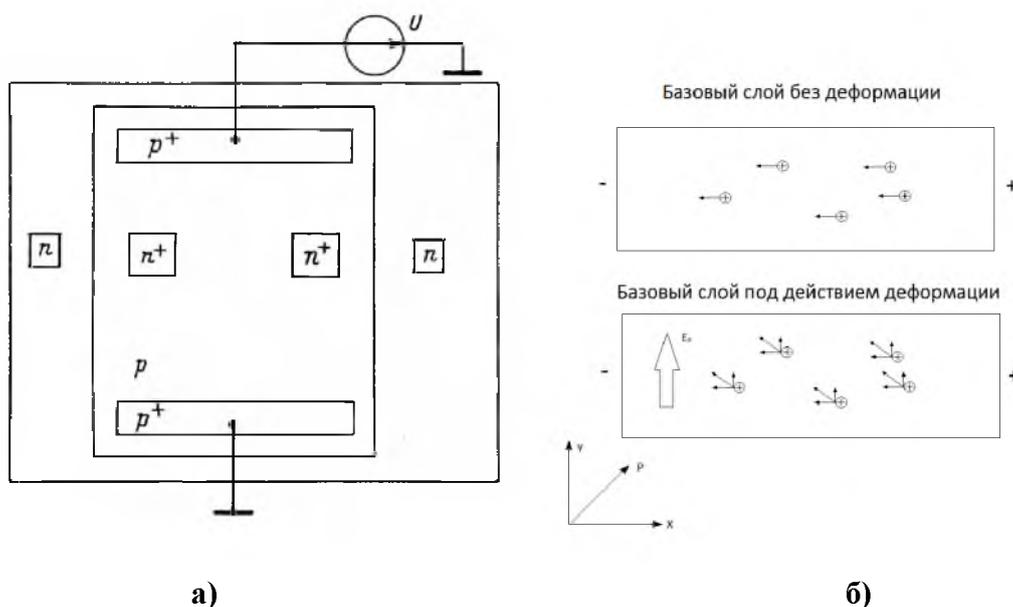


а) **Топология ЧЭ без ЖЦ; б) Топология ЧЭ с 1 ЖЦ.**

Для изображения 6 (а, б) использовалась стандартная конструкция, к примеру, вертикального БТ для проверки изменения тока. При топологии рисунка 4 БТ расположены в квадрат и разбаланс в ДК происходит как за счет разности напряжений на мембранной части, так и за счет разного КГН для плечей ДК. Рисунок металлизации имеет довольно симметричное строение, благодаря использованию низкоомных «подныров» на сравнительно большой по толщине части кристалла.

Вкратце опишем случай проверки работы БТ по причине анизотропии подвижности. Необходимо воссоздать базовую область с двумя электродами, между которыми создается направленное поле. По факту это два БТ с единой базой (изоб. 7 а).

Тогда проявится анизотропия подвижности в структуре Si и направленное движение тока в базе, создаваемое двумя электродами, приобретает дополнительный, поперечный движению без деформации вектор переноса (изоб. 7 б).



**Рис. 7. а)Тензотранзистор для проверки анизотропии подвижности; б)Перераспределение носителей тока под действием деформирующей силы.**

Введем понятие анизотропии как отношение образованного поперечного смещения подвижности к суммарной подвижности при воздействии деформации:

$$a = \frac{\mu_{yn}}{\mu_{xn}} - \frac{\mu_{yp}}{\mu_{xp}} \quad (12)$$

Происходит дополнение к направленному движению дырок  $\mu_x$  поперечной составляющей  $\mu_y$ .  $I_k$  может как увеличиваться, так и уменьшаться в зависимости от КГН (например для плоскости подложки (110) p-Si  $a \approx 0.5\pi_{44}\sigma$ ).

В доказательство теоретической модели (изменение тока коллектора  $\Delta I_k(\Delta P)$ , благодаря изменению абсолютного значения подвижности неосновных носителей  $\Delta \mu(\Delta P)$ ) был проведен эксперимент. Имеются прототипы макетных образцов КДД (габаритные размеры:  $S_{\text{крист}}=4.0 \times 4.0 \text{ mm}^2$  и  $W_{\text{крист}}=380 \mu$ ) без профилированной мембраны, создаваемые во ВНИИА, с резистивным мостом, в топологии которых спроектирована тестовая ячейка с вертикальным БТ N-P-N ( $W_{\text{базы}} = 2,5 \text{ мкм}$ ,  $W_{\text{эмиттера}} = 1,8 \text{ мкм}$ ). Схема включения с ОЭ. Вертикальный БТ выступает в качестве ЧЭ. Опираясь на вышеописанную теорию, происходит изменения абсолютного значения подвижности неосновных носителей  $\Delta \mu(\Delta P)$  за счет изменения ширины ЗЗ  $\Delta E_g(\Delta P)$ .

ЧЭ необходимо было расположить на тонкой подложке, способной значительно деформироваться при подачи давления, поэтому КДД был утонен до  $100 \mu$ . Также имеются подобные КДД, собранные в модуль, в сборке которого технически возможно деформировать ЧЭ при помощи подачи сжатого воздуха со стороны мембраны. Утоненный КДД с БТ был соединен с КДД, собранным в модуль. Соединение проведено не прецизионно, но ЧЭ расположен в области растяжения кремниевой структуры.

Активная часть базовой области БТ располагается под «дном эмиттера», поэтому протекание неосновных носителей тока проходит в направлении [100] по плоскости ориентации подложки. Для БТ имеется формула выходной характеристики, представленной в виде:

$$\Delta I_k(\Delta P) = \frac{Se\Delta D_n(\Delta P)\Delta n_i^2(\Delta P)}{N_a} \cdot \exp\left(\frac{eU}{kT}\right), \quad (14)$$

где под действием деформации изменяется как  $\Delta n_i(\Delta P)$ , так и  $\Delta D_n(\Delta P)$ . В БТ заметную роль играют токи рекомбинации, которые усложняют зависимость тока от давления, но качественные закономерности остаются прежними. В данной части вывода сделаем приближение, что при малых давлениях в проводимости принимают участия все энергетические минимумы, то происходит лишь изменение подвижности неосновных носителей  $\Delta\mu_n(\Delta P)$  и, как следует из соотношения Эйнштейна, изменение  $\Delta D_n(\Delta P)$ :

$$\Delta D_n(\Delta P) = \varphi_T \cdot \Delta\mu_n(\Delta P). \quad (15)$$

Так же в случае вырожденного п\п изменение концентрации неосновных носителей существенно ниже изменения концентрации в невырожденном п\п и её фактически можно не учитывать.

В частном виде для направления [100] формулу (5) можно переформировать как:

$$\Delta\mu_n(\Delta P) = \frac{\frac{1}{3}\mu_{\parallel} \exp\left(-\frac{\Delta E_{[100]}}{kT}\right) + \frac{1}{3}\mu_{\perp} \exp\left(-\frac{\Delta E_{[010]}}{kT}\right) + \frac{1}{3}\mu_{\perp} \exp\left(-\frac{\Delta E_{[001]}}{kT}\right)}{\sum_{i=1}^N \exp\left(-\frac{\Delta E_i}{kT}\right)}, \quad (14)$$

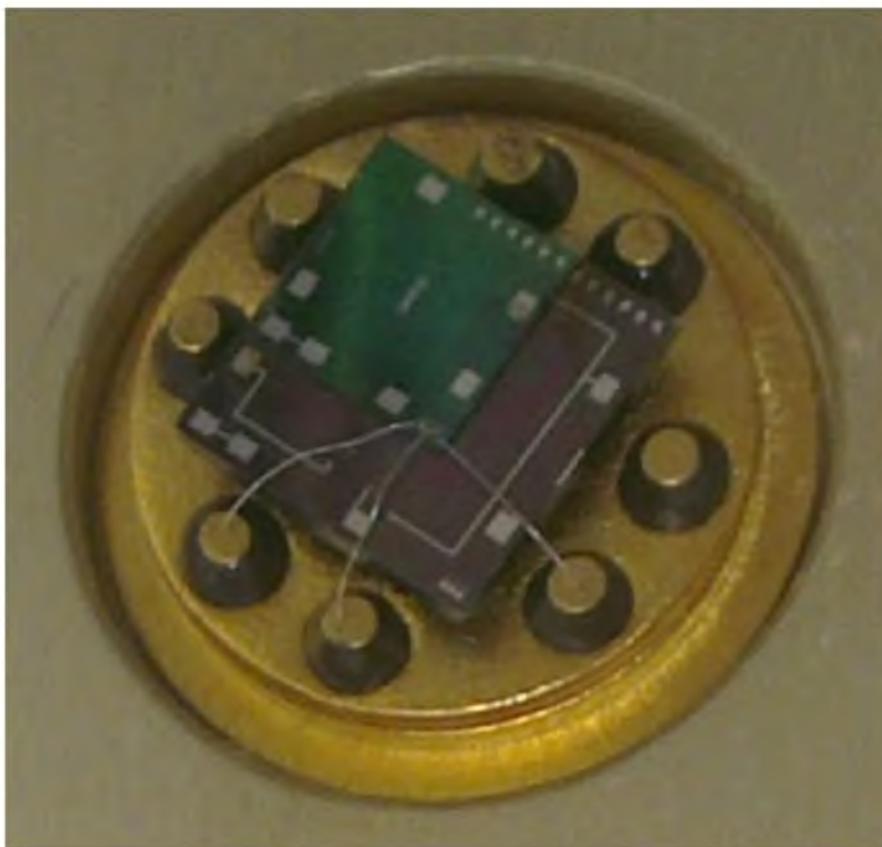
где  $\Delta E_{[100], [010], [001]}$  – это изменение энергетического уровня ЗП в направлении [100], [010] и [001], соответственно; минимум  $\Delta_1$  ЗС имеет минимумы ЗП в 6 равнозначных направлениях ([100], [010], [001] и их отрицания). Данную деформация можно назвать простой одноосной и характер изменения  $\Delta E$  по КГН в минимуме  $\Delta_1$  выполняется по следующему закону: во время сжатия минимум ЗП по направлению деформации понижается, в то время как минимумы других КГН для  $\Delta_1$  возрастают (при растяжении процесс происходит полностью наоборот; см. табл. 2). Пример работы закона был представлен для деформации в направлении [001]:

Таблица 2. **Изменение ЗС при простой одноосной деформаций.**

Деформация	Направление действия силы	$\Delta E_{[100]} \cdot 10^{-11}$ эВПа	$\Delta E_{[010]} \cdot 10^{-11}$ эВПа	$\Delta E_{[001]} \cdot 10^{-11}$ эВПа	$\Delta E_{v+} \cdot 10^{-11}$ эВПа	$\Delta E_{v-} \cdot 10^{-11}$ эВПа	$\Delta E_g \cdot 10^{-11}$ эВПа
Простое сжатие	[001]	3,57	3,57	-4,72	2,67	0	-7,39
Простое растяжение		-3,57	-3,57	4,72	0	2,67	-3,57

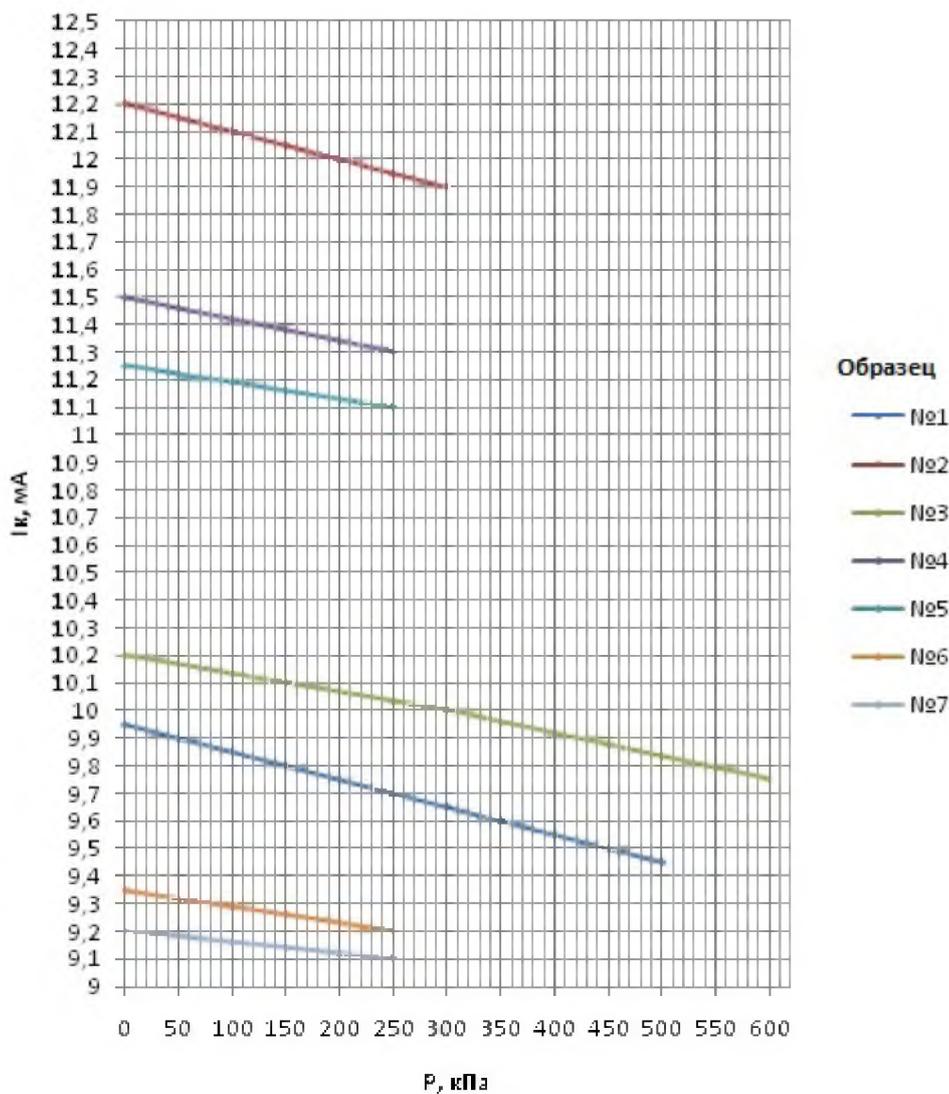
БТ расположен в зоне растяжения. Для Si имеется экспериментально полученное соотношение ( $\chi$ ) между эффективными массами  $\mu_n$  и  $\mu_p$  равное  $\approx 4,82$ . Исходя из формулы (15) возможно проследить следующее отношение для изменения подвижности  $\Delta\mu(\Delta P)$  при малых давлениях на растяжение. Выбрав усредненное значение подаваемого давления на образцы  $P = 400$  кПа и усредненное значение изменения  $\Delta E_i$ , получаем отношение  $\Delta E_{[100]}/kT$  ( $T = 300$  К,  $k = 8,617 \cdot 10^{-5}$  эВ/К) порядка  $\approx 10^{-3}$ . Функция  $\exp(-\Delta E_{[100]}/kT)$ , где  $\Delta E_{[100]}$  имеет положительное значение, является значением близким к 1, но фактически меньше 1, в то время как функция  $\exp(-\Delta E_{[010],[001]}/kT)$ , где  $\Delta E_{[010],[001]}$  имеет отрицательное значение, является значением близким к 1, но фактически больше 1. Подставляя вышеописанные соотношения в формулу (15) можно сказать, что при растяжении вдоль [100]  $\Delta\mu(\Delta P)$  будет уменьшаться. Следовательно, т.к.  $\Delta I_k(\Delta P)$  пропорционально  $\Delta\mu_n(\Delta P)$ , то выходная характеристика  $\Delta I_k(\Delta P)$  будет уменьшаться.

Максимально подаваемое давление, при котором конструкция остается целостной, варьируется от  $P_{\min}=250$  кПа до  $P_{\max}=600$  кПа (изоб. 8)



**Рис. 8. Фотография модели конструкции модуля КДД с БТ.**

Условия измерения  $\Delta I_k(\Delta P)$  на практике:  $I_6=0,1$  мА был выбран по причине постоянства коэффициента усиления  $\beta$  в окрестностях данного тока;  $U_{кз}=10$ В. Все образцы имели схожий характер изменения  $I_k(P)$ . Ток коллектора снижался с подачей давления, что подтверждается теоретической моделью. Зависимость  $\Delta I_k(\Delta P)$  представлены на графике (изоб. 9).



**Рис. 9. Зависимость тока коллектора БТ от подаваемого давления  $\Delta I_k(\Delta P)$  для семи образцов.**

**Вывод:**

1. Все вышеописанные электрические параметры имеют корень причины в смешение энергетических уровней ВЗ и ЗП в многодолинной структуре полупроводникового кремния Si.
2. При простой одноосной малой ( $P \ll 10^9$  Па) деформации высшим в порядке изменения значения является подвижность  $\Delta\mu(\Delta P)$ .
3. Работа ЧЭ может быть получена на:
4. эффекте изменения тока неосновных носителей в базе БТ (следствие из  $\Delta\mu(\Delta P)$ ).
5. эффекте изменения  $\Delta\mu(\Delta P)$  в разных КГН (анизотропия).
6. Было получено экспериментальное подтверждение построенной модели для случая вертикального n-p-n БТ расположенного в области растяжения на мембранной части.

Заключение: Тензоэффект на БТ проявляется как изменение значения тока неосновных носителей в базе. При различном расположении схемы на БТ относительно мембраны возможно построение КДД с выходным сигналом высокой чувствительности (при сравнении с распространенным ЧЭ на тензорезистивном эффекте (ТРЭ)), и, как следствие для конструк-

ции, уменьшение габаритных размеров (к примеру, компания IMEC производит КДД на ТРЭ с  $S_{\text{крист}}=0,25 \times 0,25 \text{mm}^2$ ). Технология создания ЧЭ на БТ не отличается повышенной «мощностью процессов», относительно создания ЧЭ на ТРЭ. Проведя поиск устройств данного типа на мировом рынке среди крупных компаний, датчиков работающих на данном эффекте не найдено.

### Список литературы

1. Полякова А.Л. Деформация полупроводников. 1979
2. Бабичев Г. Г., Гузь В. Н. Исследование биполярного двухколлекторного тензотранзистора с ускоряющим электрическим полем в базе. 1992
3. Бабичев Г. Г., Козловский С.И. Кремниевый двухэмиттерный дифференциальный тензотранзистор с ускоряющим электрическим полем в базе. 1999
4. Бабичев Г. Г., Козловский С.И. Кремниевый однопереходный тензотранзистор. 2001
5. Степаненко И.П. Основы теории транзисторов и транзисторных схем. 1977
6. Степаненко И. Основы микроэлектроники. 2001
7. Агеев О. А., Мамиконова В.М. Микроэлектронные преобразователи неэлектрических величин. 2000