

## РАДИОФИЗИЧЕСКИЕ ЯВЛЕНИЯ В ТВЕРДОМ ТЕЛЕ И ПЛАЗМЕ

УДК 53.082.731+531.787.916

### СТРУКТУРЫ “КРЕМНИЙ НА САПФИРЕ” КАК МАТЕРИАЛ ДЛЯ ТЕНЗОПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ МЕХАНИЧЕСКИХ ВЕЛИЧИН

© 2005 г. В. М. Стучебников

Поступила в редакцию 01.11.2004 г.

Рассмотрены особенности гетероэпитаксиальных структур “кремний на сапфире”, позволяющие использовать их в качестве тензочувствительных элементов преобразователей механических величин. Обсуждены свойства разработанных преобразователей давления и проблемы их дальнейшего развития.

#### ВВЕДЕНИЕ

Гетероэпитаксиальные слои кремния на сапфире (КНС) [1] впервые были получены в середине 60-х годов XX в. и сразу привлекли к себе внимание как специалистов по полупроводниковому материаловедению, так и разработчиков твердотельных микросхем. В первую очередь это было связано с ожидаемым повышением быстродействия комплементарных структур металл–окисел–полупроводник (КМОП) на основе КНС, обусловленным сапфировой подложкой с высокими диэлектрическими свойствами, а также возможной высокой радиационной стойкостью микросхем на основе КНС. Эти ожидания вызвали большое количество работ по технологии выращивания слоев КНС, исследованию их структуры и электрических свойств [1]. Впрочем, последующее развитие КМОП-технологии на объемном кремнии позволило резко повысить быстродействие кремниевых микросхем, существенно снизить их стоимость по сравнению с относительно дорогими структурами КНС. Поэтому в настоящее время основным применением структур КНС в полупроводниковом приборостроении является разработка радиационностойких микросхем, где, по крайней мере в настоящее время, структурам КНС практически нет конкуренции (см., например, [2, 3]), а также микросхем для оптоэлектронных систем [4].

Однако практически сразу после начала серьезных разработок технологии КНС наметилось еще одно направление использования этих структур – тензорезисторные преобразователи (ТП) механических величин [5, 6]. Это направление было предложено и успешно развивалось в нашей стране сначала в НИИ Теплоприборе (г. Москва) и НИИ Измерительной техники (г. Королев), а затем в НПК “Ульяновский центр микроэлектроники и автоматизации в машиностроении” и промышленной группе (ПГ) “Микроэлектронные датчики” (ПГ МИДА, г. Ульяновск), ПГ Метран

(г. Челябинск) и других предприятиях. На базе тензочувствительных элементов из КНС были разработаны и освоены в серийном производстве датчики давления “Кристалл” [7], измерительные комплексы “Сапфир” [8] и “Сапфир-22” [9], серия датчиков давления МИДА [10] и др.

По сравнению с широко используемыми твердотельными кремниевыми тензочувствительными элементами с диффузионными или имплантированными тензорезисторами полупроводниковые чувствительные элементы (ПЧЭ) на основе КНС имеют ряд преимуществ [11, 12]. Во-первых, в ПЧЭ на основе КНС отсутствует  $p-n$ -переход, изолирующий тензорезисторы от подложки в твердотельных ПЧЭ, что позволяет в десятки раз повысить пробивное напряжение датчиков и в несколько раз увеличить рабочую температуру ПЧЭ. Во-вторых, однородное легирование слоя кремния позволяет эффективно управлять характеристиками ПЧЭ и приборов на их основе. В-третьих, наличие прочной изолирующей подложки значительно расширяет возможности совершенствования тензочувствительной схемы и характеристик ТП. В-четвертых, структуры КНС (и ПЧЭ на их основе) обладают высокой радиационной стойкостью. Немаловажным является и то обстоятельство, что технология изготовления преобразователей механических величин с ПЧЭ на основе КНС практически не требует чистых условий твердотельного производства. В целом применение структур КНС в тензопреобразователях оказалось настолько удачным, что, например, в абсолютном большинстве датчиков давления, выпускаемых в настоящее время в России, используются тензочувствительные элементы на основе структур КНС [13–15]. В последнее время структуры КНС начали использоваться в датчиках давления и зарубежными фирмами [16–18].

В данном обзоре кратко рассмотрены особенности структур КНС, обеспечившие их широкое применение в тензопреобразователях механических

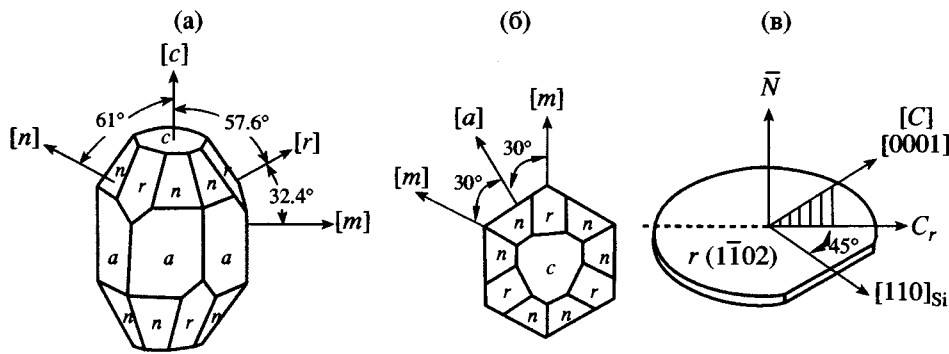


Рис. 1. Кристаллографические плоскости и направления в лейкосапфире ( $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ ) (три эквивалентные плоскости  $r$  имеют соответственно индексы  $(1\bar{1}02)$ ,  $(01\bar{1}2)$ ,  $(\bar{1}012)$ ) (а, б) и кристаллографические направления в структуре КНС на плоскости  $r(1\bar{1}02)$  сапфира с плоскостью  $(001)$  кремниевого слоя;  $N$  – нормаль к подложке,  $C_r$  – проекция оси  $C$  сапфира на плоскость  $r$  (срез на подложке перпендикулярен направлению  $[110]$  кремния) [21].

ких величин, характеристики современных отечественных датчиков давления на основе КНС и перспективы дальнейшего развития ТП с использованием чувствительных элементов из КНС.

## 1. ЭЛЕКТРОФИЗИКА СТРУКТУР КНС

Структуры КНС представляют собой тонкие (0.1–5 мкм) слои монокристаллического кремния, выращенные (обычно разложением моносилана) на монокристаллическом лейкосапфире ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) [1]. Так как сапфир и кремний имеют разную кристаллическую структуру, то монокристаллические слои кремния растут лишь при определенных кристаллографических ориентациях подложки [19]. Наиболее широко используются в электронной промышленности (и одновременно более всего пригодны для тензочувствительных элементов [20]) структуры с кристаллографической ориентацией  $(001)_{\text{Si}}/(1\bar{1}02)_{\text{Al}_2\text{O}_3}$  (рис. 1) [21]. Наилучшими характеристиками для тензорезисторов обладают (как и в твердотельных ПЧЭ) сильнолегированные слои кремния  $p$ -типа проводимости ( $p > 10^{18} \text{ см}^{-3}$ ).

Характерными особенностями структур КНС, определяющими электрофизические характеристики слоя кремния [1, 22, 23], являются: легирование слоя кремния при наращивании алюминием из подложки; дефектность слоя кремния; большие термические напряжения в структурах. При пиролизе моносилана в результате взаимодействия сапфира с компонентами газовой смеси ( $\text{SiH}_4 : \text{H}_2$ ) происходит выделение окиси алюминия или свободного алюминия. Алюминий, будучи мелким акцептором, загрязняет растущий слой кремния, особенно на начальной стадии. Однако поскольку кремниевые тензорезисторы обычно изготавливаются из сильнолегированного кремния  $p$ -типа, то сравнительно невысокая концентрация алю-

миния ( $N_{\text{Al}} \sim 10^{15} \text{ см}^{-3}$ ) практически не влияет на характеристики кремниевого слоя.

Различие в типах и постоянных кристаллических решеток сапфира и кремния, разориентация зародышей кремния при росте слоя и релаксация термических напряжений обуславливают высокую дефектность слоя кремния, особенно вблизи границы с сапфиром (рис. 2). В результате подвижность носителей в слоях КНС ниже, чем в объемном кремнии (рис. 3). Однако в сильнолегированных слоях КНС подвижность практически не зависит от толщины  $d$  слоя кремния (вплоть до  $d \sim 0.15$  мкм) (рис. 4), что свидетельствует о незначительном вкладе рассеяния на дефектах в полную подвижность дырок. Это означает, что для сильнолегированного  $p$ -КНС (при условии хорошо отработанной технологии выращивания слоя кремния) существует однозначная зависимость

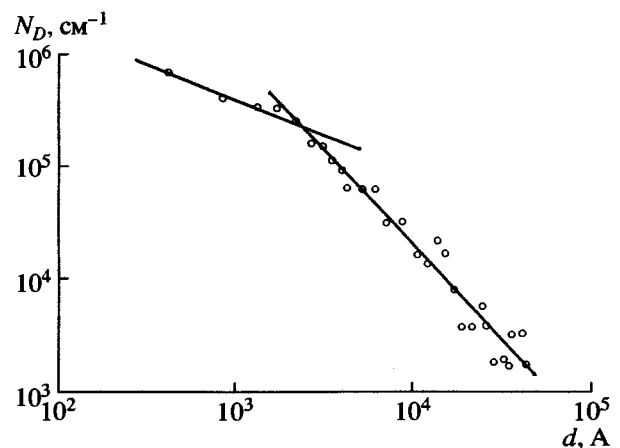


Рис. 2. Зависимость линейной плотности дефектов в слое КНС от расстояния до границы кремний–сапфир;  $N_D \leq 10^2 \text{ см}^{-1}$  при  $d \geq 4$  мкм (предел разрешения метода) [24].

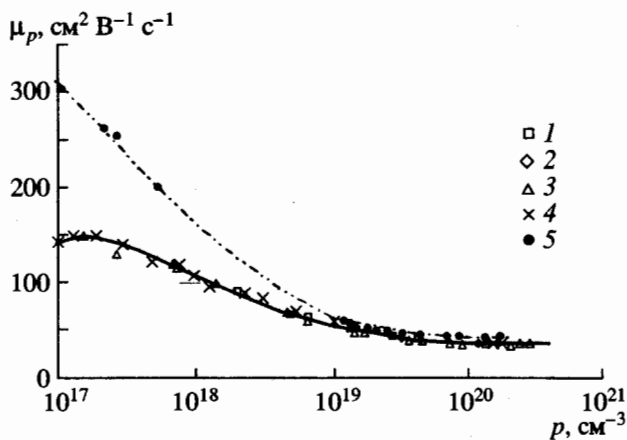


Рис. 3. Зависимость подвижности дырок в *p*-КНС от концентрации носителей тока при комнатной температуре [25]. Толщина слоя кремния *d*, мкм:  $d < 1$  (1);  $1 \leq d \leq 2$  (2);  $d > 2$  (3); значения (4) взяты из [26] ( $d = 2$  мкм); данные для объемного кремния (5) взяты из [27].

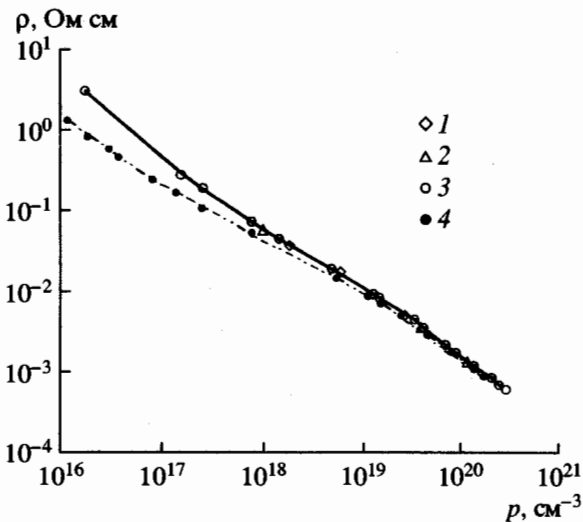


Рис. 5. Зависимость удельного сопротивления КНС *p*-типа проводимости от концентрации дырок при комнатной температуре; толщина слоя кремния *d*, мкм:  $d < 1$  (1);  $1 \leq d \leq 2$  (2);  $d > 2$  (3); данные для однородного легированного кремния (4) взяты из [28].

удельного сопротивления от концентрации дырок, аналогичная хорошо известной для объемного кремния (рис. 5).

Поскольку лейкосапфир имеет коэффициент теплового расширения почти вдвое больше, чем кремний (рис. 6), то в структурах КНС возникают большие термические напряжения, неоднородные по толщине слоя кремния *d* и сапфировой подложки *D* (рис. 7). Чисто механически термические напряжения в КНС проявляются в изгибе структуры; измерения радиуса кривизны позволяют непосред-

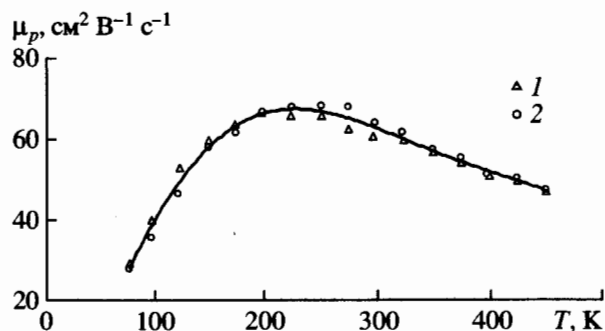


Рис. 4. Температурная зависимость подвижности дырок в КНС с толщиной слоя кремния 4.5 (1) и 0.15 мкм (2);  $p = 6.0 \times 10^{18} \text{ см}^{-3}$ ,  $\rho = 0.017 \text{ Ом см}$  [25].

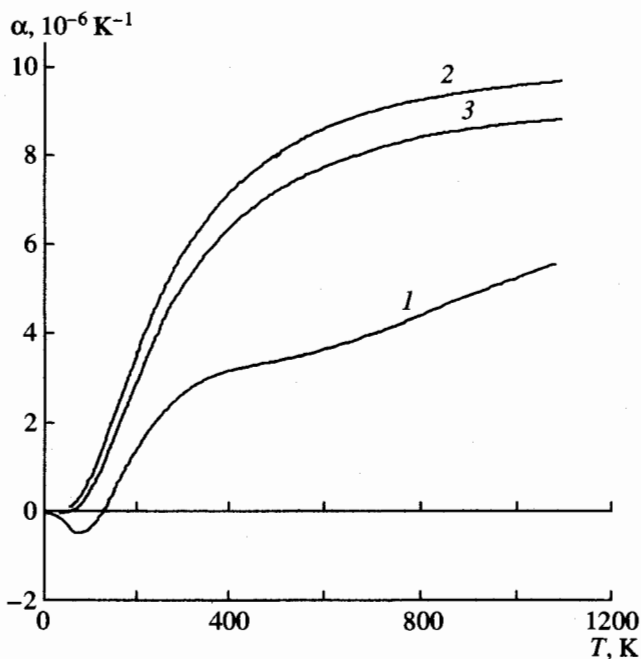


Рис. 6. Линейные тепловые коэффициенты расширения кремния [29, 30] (кривая 1) и лейкосапфира параллельно (2) и перпендикулярно (3) к оси *C* [31] в интервале температур 6...1100 К.

ственно определить величину средних термических напряжений  $\tau_0$  в кремнии [33], которая составила  $(4...6) \times 10^8 \text{ Па}$ , что хорошо согласуется с расчетом. При увеличении толщины слоя кремния до величины  $d/D > 0.4$  напряжения в сапфировой подложке возрастают настолько, что в интервале температур 1100...900°C происходит пластическая деформация сапфира и изгиб структуры КНС становится больше расчетного [34]. Изгиб структур КНС затрудняет их наращивание, приводит к неоднородности слоя кремния и к браку при фотолитографии, поэтому для получения вы-

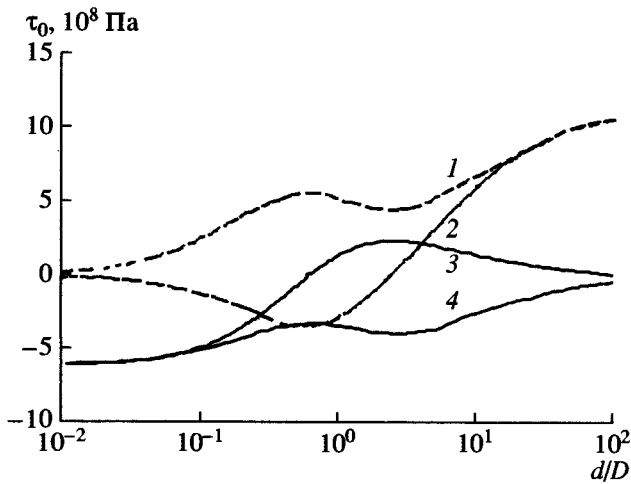


Рис. 7. Расчетные термические напряжения в сапфировой подложке (на границе с кремнием (1) и на свободной поверхности (2)) и в слое кремния (на свободной поверхности (3) и на границе с сапфиром (4)) в зависимости от отношения толщин слоя кремния  $d$  и подложки  $D$  [32].

сокачественных структур необходимо использовать достаточно толстую подложку ( $d/D < 0.01$ ). Термические напряжения искажают зонную структуру кремния и влияют на его электрофизические характеристики [22]. Поскольку в структурах КНС термические напряжения в сплошном слое кремния практически однородны и изотропны, то в  $p$ -КНС они почти не влияют на подвижность дырок и, как следствие, на удельное сопротивление кремния. Вместе с тем из-за нелинейности тензорезистивного эффекта термическое сжатие слоя кремния изменяет температурную зависимость коэффициента тензочувствительности ПЧЭ [25]. Сильное влияние термические напряжения оказывают на свойства узких кремниевых тензорезисторов, имеющих вид мезаструктур (см. ниже).

Экспериментальные исследования показали, что температурная зависимость удельного сопротивления  $\rho(T)$  однородного сплошного слоя кремния в сильнолегированных структурах  $p$ -КНС хорошо описывается экспоненциальным законом

$$\rho(T) = \rho_0 \exp(\alpha_p T), \quad (1)$$

где  $\alpha_p$  – дифференциальный температурный коэффициент удельного сопротивления кремния, сохраняющий постоянное значение в широком интервале температур при определенных уровнях легирования [11].

## 2. ТЕНЗОРЕЗИСТИВНЫЙ ЭФФЕКТ В СТРУКТУРАХ $p$ -КНС

Детальное исследование тензоэффекта в сильнолегированных структурах  $p$ -КНС было прове-

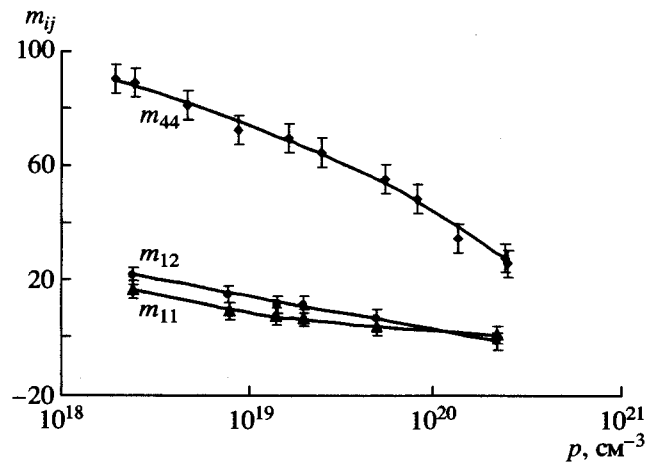


Рис. 8. Зависимость коэффициентов эластосопротивления  $p$ -КНС от концентрации дырок при комнатной температуре [37].

дено в диапазоне температур 4...800 К [11, 35–38]. Зависимость удельного сопротивления кремния от деформации может быть представлена в виде

$$\rho_i \approx \rho_0 (1 + m_{ij} \varepsilon_j + m_{ijk} \varepsilon_j \varepsilon_k + m_{ijkl} \varepsilon_j \varepsilon_k \varepsilon_l), \quad (2)$$

$$i, j, k, l = 1, 2, \dots, 6,$$

где  $\rho_0$  – изотропное удельное сопротивление недеформированного кремния,  $\rho_i$ ,  $\varepsilon_j$  – компоненты матриц удельного сопротивления и деформации,  $m_{ij}$ ,  $m_{ijk}$  и  $m_{ijkl}$  – компоненты матриц линейного, квадратичного и кубического коэффициентов эластосопротивления. Из (2) следует, что сопротивление кремниевых тензорезисторов, вообще говоря, нелинейно зависит от их деформации. Обычно чувствительность тензорезисторов к деформации описывается коэффициентом тензочувствительности  $K$ :

$$\begin{aligned} \Delta R/R &= K(T) \varepsilon = \\ &= K^{(1)}(T) \varepsilon + K^{(2)}(T) \varepsilon^2 + K^{(3)}(T) \varepsilon^3, \end{aligned} \quad (3)$$

где  $\Delta R/R$  – относительное изменение сопротивления тензорезистора,  $\varepsilon$  – характерная деформация ПЧЭ (линейно связанная с компонентами матрицы деформации  $\varepsilon_j$ ), а  $K^{(1)}$ ,  $K^{(2)}$  и  $K^{(3)}$  – линейный, квадратичный и кубический коэффициенты тензочувствительности (определяемые соответственно величинами  $m_{ij}$ ,  $m_{ijk}$  и  $m_{ijkl}$ ). Для диффузионных кремниевых тензорезисторов  $p$ -типа с ориентацией  $\langle 110 \rangle$  на плоскости  $(001)$  кремния (обычно используемых в твердотельных ПЧЭ) при характерной деформации  $\varepsilon$ , параллельной направлению тензорезистора, пренебрежимо мал квадратичный коэффициент тензочувствительности, а при перпендикулярной деформации – кубический коэффициент [39].

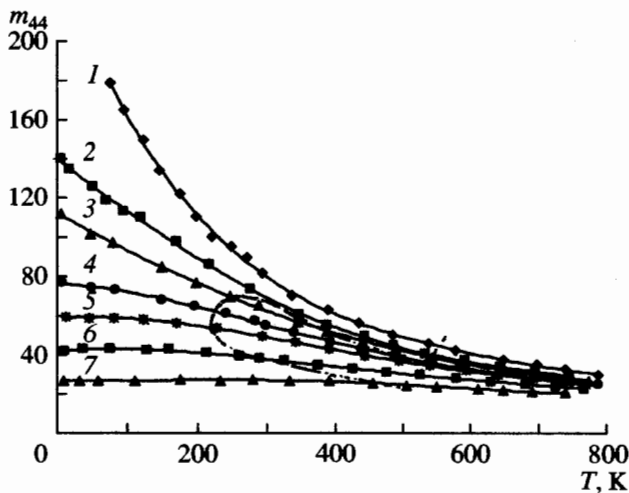


Рис. 9. Температурная зависимость коэффициента  $m_{44}$ . Штриховой линией выделены области, в которых выполняется соотношение (4). Концентрация дырок:  $4.6 \times 10^{18}$  (1),  $1.6 \times 10^{19}$  (2),  $2.3 \times 10^{19}$  (3),  $5.4 \times 10^{19}$  (4),  $8.4 \times 10^{19}$  (5),  $1.3 \times 10^{20}$  (6),  $2.3 \times 10^{20} \text{ см}^{-3}$  (7).

При комнатной температуре значения линейных коэффициентов матрицы эластосопротивления  $m_{11}$ ,  $m_{12}$  и  $m_{44}$  в  $p$ -КНС (рис. 8) близки к соответствующим значениям для объемного кремния, хотя при низких температурах наблюдается значительное отличие этих коэффициентов в  $p$ -КНС и  $p$ -Si [36], что в основном определяется термическими напряжениями в слое кремния. В отличие от объемного (и тем более от диффузионных слоев) кремния экспериментальная температурная зависимость основного коэффициента эластосопротивления  $m_{44}$  хорошо описывается экспоненциальным законом

$$m_{44}(T) = m_{440} \exp(\alpha_m T), \quad (4)$$

причем температурный коэффициент эластосопротивления  $\alpha_m$  сохраняет постоянное значение в широком диапазоне температур при определенных величинах концентраций дырок (рис. 9).

Что касается нелинейных коэффициентов эластосопротивления, то, в отличие от диффузионных кремниевых тензорезисторов, в тензорезисторах из  $p$ -КНС кубический коэффициент тензочувствительности пренебрежимо мал при любой взаимной ориентации деформации и оси тензорезистора. Квадратичные коэффициенты тензочувствительности продольных и поперечных (относительно направления деформации) тензорезисторов существенно зависят от температуры, но в интервале температур 4...800 К незначительно отличаются друг от друга (рис. 10) [38].

То обстоятельство, что удельное сопротивление и коэффициент эластосопротивления  $m_{44}$  в  $p$ -КНС имеют экспоненциальную температур-

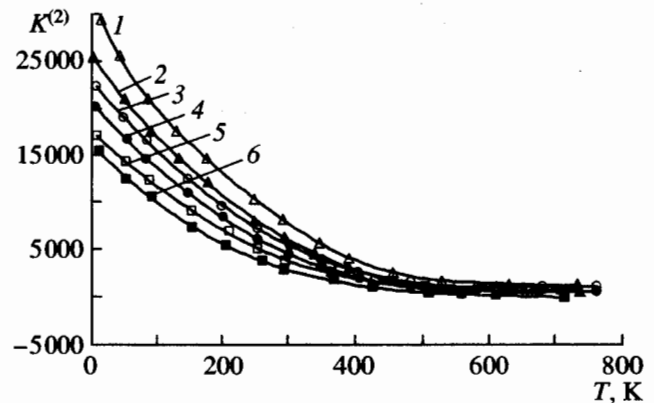


Рис. 10. Температурные зависимости квадратичных коэффициентов тензочувствительности для продольных (1, 3, 5) и поперечных (2, 4, 6) относительно деформации тензорезисторов из  $p$ -КНС, ориентированных вдоль  $\langle 110 \rangle$ ; концентрация дырок:  $2 \times 10^{19}$  (1, 2);  $6 \times 10^{19}$  (3, 4),  $1.4 \times 10^{20} \text{ см}^{-3}$  (5, 6).

ную зависимость (1) и (4) в определенной области уровней легирования, имеет большое значение для построения высокоточных тензопреобразователей механических величин. Было показано [25, 37], что для широко распространенных ТП с ПЧЭ мембранного типа, на которых тензорезисторы, ориентированные вдоль кристаллографических направлений  $\langle 100 \rangle$ , расположены у края мембраны и соединены в мостовую схему, выходной сигнал  $U$  связан с измеряемым механическим параметром  $M$  (например, давлением) соотношением

$$U = I_{\text{пит}} R_0 K_s m_{44} M \quad (5)$$

при питании мостовой схемы постоянным током  $I_{\text{пит}}$  или

$$U = U_{\text{пит}} K_s m_{44} M \quad (6)$$

при питании мостовой схемы постоянным напряжением  $U_{\text{пит}}$ . Здесь  $R_0$  – исходное (при  $M = 0$ ) сопротивление моста, а  $K_s$  – коэффициент упругого преобразования измеряемого механического параметра в характерную деформацию ПЧЭ  $\epsilon$ :  $\epsilon = K_s(T)M$ .

Из (5) следует, что для обеспечения независимости выходного сигнала ТП (точнее, чувствительности ТП к измеряемому механическому параметру  $M$ ) должно выполняться условие

$$\alpha_R + \alpha_s + \alpha_m = 0, \quad (7)$$

где  $\alpha_R = (dR(T)/dT)/R(T) \approx (d\rho(T)/dT)/\rho(T) = \alpha_\rho$  – дифференциальный температурный коэффициент сопротивления (практически равный температурному коэффициенту удельного сопротивления  $\alpha_\rho$ ),  $\alpha_s = (dK_s(T)/dT)/K_s(T)$  – дифференциальный температурный коэффициент упругого преобразования ТП, который в широком диапазоне темпера-

тур можно считать постоянным. Тогда уравнение (7) можно записать в виде

$$\alpha_p + \alpha_m = -\alpha_s \approx \text{const.} \quad (8)$$

Как следует из (1) и (4), при определенных уровнях легирования  $p$ -КНС сумма  $\alpha_p + \alpha_m$  остается постоянной в достаточно широком интервале температур. Это явление получило название “дифференциально-температурная инвариантность пьезосопротивления” (ДТИП) [11]. Область ДТИП показана на рис. 11а; как видно, она состоит из двух зон – низкотемпературной ( $p \approx 2.7 \times 10^{19} \dots 3 \times 10^{20} \text{ см}^{-3}$ ) и высокотемпературной ( $p \approx 1.5 \times 10^{18} \dots 7 \times 10^{19} \text{ см}^{-3}$ ). Поскольку дифференциальные температурные коэффициенты удельного сопротивления  $\alpha_p$  и эластосопротивления  $\alpha_m$  имеют разные знаки, то в некоторых случаях может выполняться равенство (8). Как видно из рис. 11б, в зависимости от величины  $\alpha_s$ , это происходит при определенных концентрациях дырок ( $p_{10}$  и  $p_{20}$  при  $\alpha_s = 0$  или  $p_1$  в низкотемпературной и  $p_1$  и  $p_2$  – в высокотемпературной зонах области ДТИП).

При питании тензомоста постоянным напряжением условие температурной независимости выходного сигнала (6) имеет вид

$$\alpha_s + \alpha_m = 0. \quad (9)$$

Как видно из рис. 9, при низких температурах и высокой концентрации носителей тока ( $p \geq 10^{20} \text{ см}^{-3}$ ) коэффициент  $m_{44}$  перестает зависеть от температуры ( $\alpha_m = 0$ ), что с учетом малости коэффициента  $\alpha_s$  дает возможность создания высокоточных преобразователей давления криогенных сред [40].

### 3. СВОЙСТВА УЗКИХ ТЕНЗОРЕЗИСТОРОВ ИЗ $p$ -КНС

Тензорезисторы в ПЧЭ на основе КНС имеют вид длинных узких мезоструктур, соединенных нижним основанием с сапфировой подложкой. В таких мезоструктурах термические напряжения, связанные с различием коэффициентов теплового расширения кремния и сапфира, могут играть весьма значительную роль.

На краю кремниевого слоя из-за релаксации механических напряжений в верхней части свободной грани кремния возникают значительные сдвиговые напряжения, причем величина их максимальна на линии контакта сапфир–кремний–воздух (рис. 12). Величина сдвиговых напряжений экспоненциально убывает от линии контакта как вглубь слоя кремния, так и вдоль его. Поэтому в длинных узких резисторах, сформированных в виде мезоструктур, средняя величина термических напряжений вдоль и поперек резистора будет различной; в результате из-за тензорезистивного эффекта возникает анизотропия удельного сопротивления, зависящая от геометрического

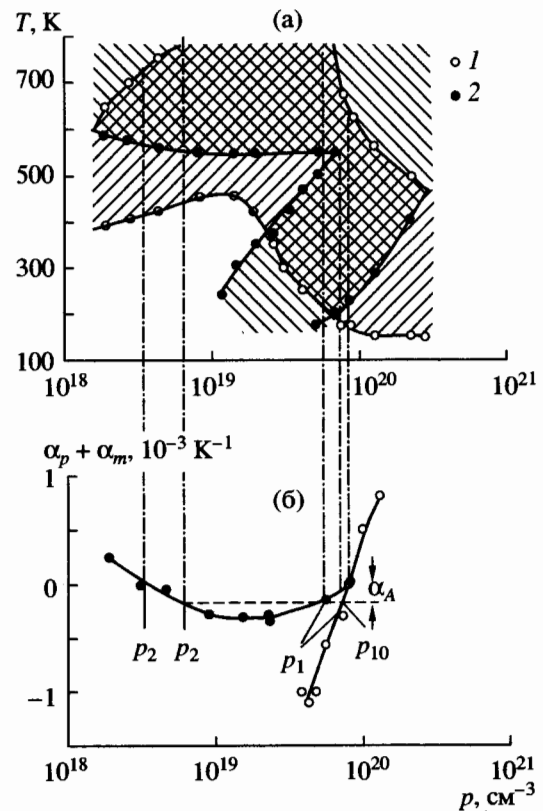
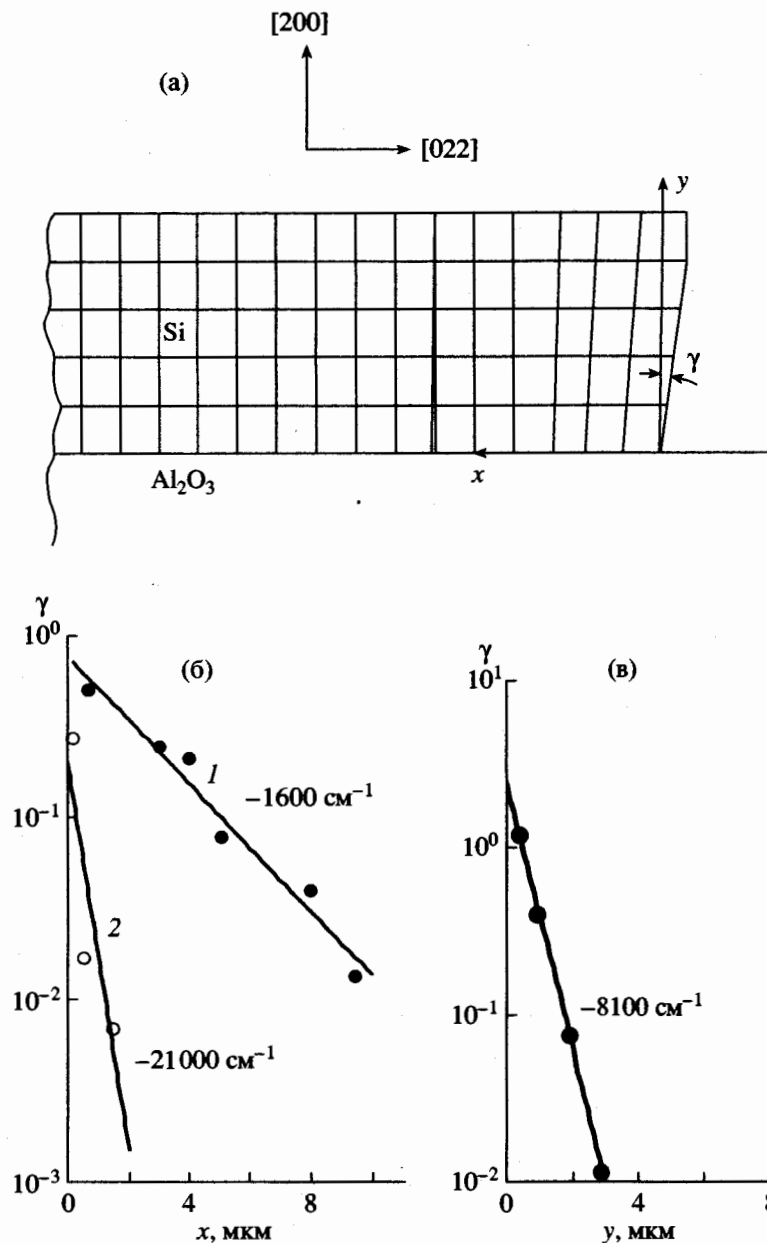


Рис. 11. Границы областей постоянства  $\alpha_p$  (1) и  $\alpha_m$  (2), область дифференциально-температурной инвариантности пьезосопротивления в  $p$ -КНС выделена двойной штриховкой (а). Концентрационная зависимость суммы  $\alpha_p + \alpha_m$  в области ДТИП (б); показаны температурные зоны, в которых выполняется соотношение (8) [12].

фактора – отношения ширины  $b$  резистора к толщине  $d$  слоя кремния [42–44] (рис. 13). Как показано в [42], экспериментальные данные хорошо описываются аналитическими выражениями, полученными в предположении, что термическая деформация резистора вдоль его оси остается такой же, как в сплошном слое кремния:  $\epsilon_{\parallel} = \epsilon_{T_0}$ , а поперечная деформация ослабляется в  $\xi$  раз:  $\epsilon_{\perp} = \xi \epsilon_{T_0}$ ; при этом  $\xi \approx 1 - \exp(-0.11b/d)$ . Как следует из расчета, наибольшая зависимость удельного сопротивления от геометрического фактора имеет место для резисторов, ориентированных в направлении  $\langle 110 \rangle$ , что подтверждается экспериментально (рис. 13б). Изменение удельного сопротивления в узких резисторах полностью определяется изменением подвижности носителей вследствие тензорезистивного эффекта [43].

От геометрических размеров резисторов из КНС зависит не только удельное сопротивление кремния, но и его температурный коэффициент  $\alpha_p$  (рис. 14) [25]. Эта зависимость также хорошо



**Рис. 12.** Сдвиговые деформации в мезоструктурах из КНС [41]: а) схема возникновения сдвиговой деформации  $\epsilon_{\tau} = \gamma$  на краю слоя КНС, величина  $\epsilon_{\tau}$  равна отклонению  $\gamma$  направления [200] от перпендикуляра к направлению [022]; б) зависимость сдвиговой деформации от расстояния  $x$  до края слоя вдоль плоскости подложки для КНС с толщиной слоя  $d = 7$  (1) и  $0.6$  мкм (2); наклон прямых (величина  $g$  в выражении  $\epsilon_{\tau} = \epsilon_{r0} \exp(gx)$ ) равен  $-1600$  (1) и  $-21000$   $\text{см}^{-1}$  (2); в) зависимость сдвиговой деформации от расстояния  $y$  до подложки поперек слоя кремния с  $d = 7$  мкм, наклон прямой  $-8100$   $\text{см}^{-1}$ .

описывается аналитически в указанном приближении. В принципе зависимость  $\alpha_p(b/d)$  дает дополнительную возможность коррекции температурной зависимости начального выходного сигнала ТП механических величин [45], однако для этого требуется высокая степень воспроизводимости величины геометрического фактора  $b/d$  (прежде всего, толщины слоя кремния  $d$ ), практи-

чески недоступная на современном уровне технологии получения КНС.

Тензорезисторы из КНС, имеющие форму мезоструктуры, соединены с подложкой только нижней гранью, так что деформация поверхности ПЧЭ передается в объем узких тензорезисторов не полностью (особенно поперек тензорезисто-

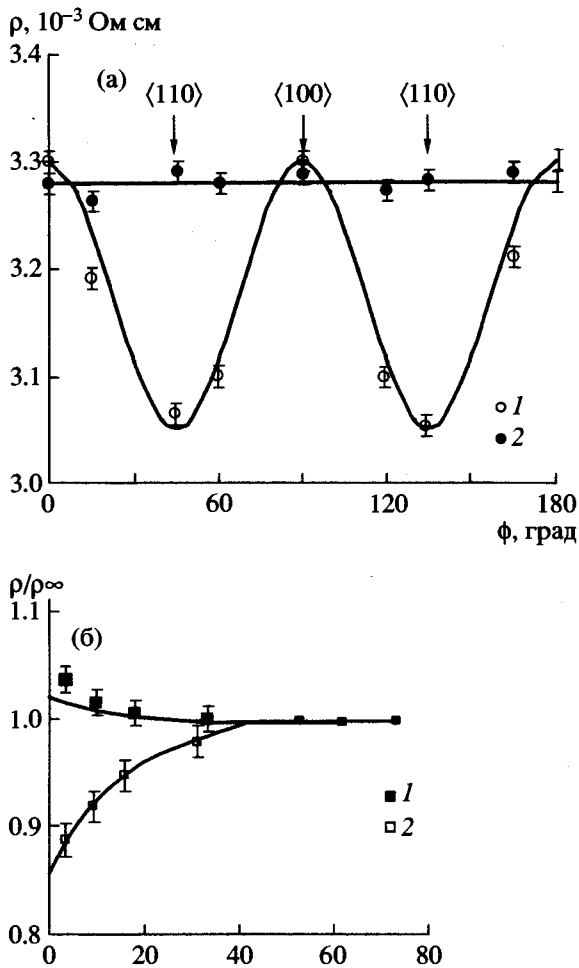


Рис. 13. Ориентационная зависимость удельного сопротивления кремния в резисторах из  $p$ -КНС;  $p = 4.8 \times 10^{19} \text{ см}^{-3}$ ;  $b/d = 9$  (1), 190 (2) (а); зависимость удельного сопротивления от геометрического фактора (б). 1 –  $p = 4.3 \times 10^{19} \text{ см}^{-3}$ , ориентация  $\langle 100 \rangle$ ; (2) –  $p = 5.4 \times 10^{19} \text{ см}^{-3}$ , ориентация  $\langle 110 \rangle$ , сплошные линии – расчет.

ра). Соответственно, как линейный, так и квадратичный коэффициенты тензочувствительности узких тензорезисторов зависят от геометрического фактора  $b/d$  (рис. 15) [46]. Это обстоятельство может быть использовано для снижения нелинейности ТП с ПЧЭ на основе КНС.

Поскольку дифференциальные температурные коэффициенты сопротивления  $\alpha_R \approx \alpha_p$  и тензочувствительности  $\alpha_K$  зависят от соотношения ширины тензорезистора  $b$  и его толщины  $d$ , то и их сумма (а следовательно, и значения оптимальных концентраций дырок  $p_{10} \dots p_2$ ) также зависит от геометрического фактора  $b/d$  (рис. 16) [25]. Это тоже необходимо учитывать при проектировании топологии ПЧЭ.

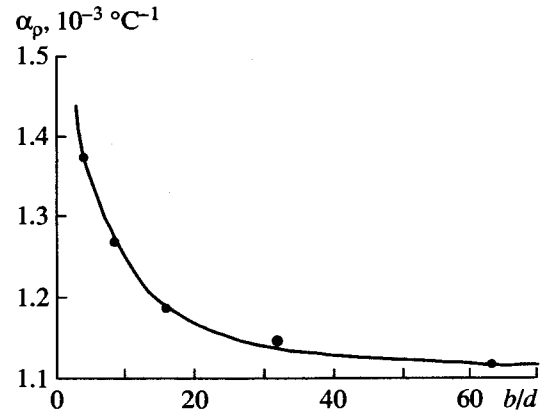


Рис. 14. Зависимость температурного коэффициента удельного сопротивления  $p$ -КНС в узких резисторах, ориентированных по направлению  $\langle 110 \rangle$ , от геометрического фактора в диапазоне температур 250...450 К; кривая – расчет.

#### 4. ВЛИЯНИЕ ОБЛУЧЕНИЯ НА СВОЙСТВА СТРУКТУР КНС

Высокая радиационная стойкость структур КНС представляет большой интерес для разработчиков преобразователей механических величин, прежде всего давления, поскольку, например, в системах управления АЭС измерение давления является важнейшим параметром. Исследования показали, что при облучении нейтронами сильнолегированных структур  $p$ -КНС наблюдается заметное изменение удельного сопротивления  $\rho$ , вызванное примерно одинаковым изменением как концентрации дырок  $p$ , так и их подвижности  $\mu$ . При этом дозовые зависимости относительного изменения всех трех величин в диапазоне  $\Phi = 0 \dots 3 \times 10^{17} \text{ см}^{-2}$  хорошо описываются феноменологическим соотношением типа

$$x(\Phi)/x(0) \approx 1 + A(1 - \exp(-a\Phi)), \quad (10)$$

где параметры  $A$  и  $a$  зависят от исходной концентрации носителей тока [47]. Аналогичные результаты были получены при облучении структур  $p$ -КНС нейтронами и  $\gamma$ -квантами в реакторе ВВР-2000 (рис. 17).

Из полученных результатов с учетом (5) и (6) следует, что для измерения механических величин в условиях облучения нейтронами и  $\gamma$ -квантами использовать ПЧЭ с тензосхемой, питаемой от источника тока, нельзя, тогда как ПЧЭ с тензосхемой, питаемой постоянным напряжением, могут успешно применяться в ТП механических величин при больших дозах облучения.



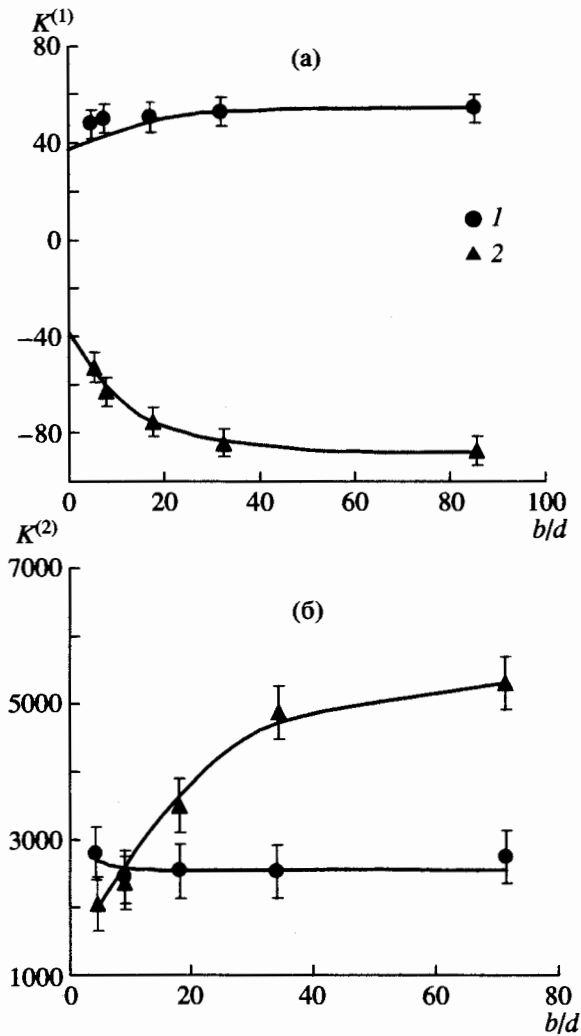


Рис. 15. Зависимость от геометрического фактора линейных (а) и квадратичных (б) коэффициентов тензочувствительности продольного (1) и поперечного (2) тензорезисторов из  $p$ -КНС на балочном ПЧЭ; ориентация тензорезисторов  $\langle 110 \rangle$ ,  $p \approx 5 \times 10^{19} \text{ см}^{-3}$ , кривые на (а) – расчет.

## 5. ТЕНЗОПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ ДАВЛЕНИЯ НА ОСНОВЕ КНС

### А. Конструкции тензорезисторных преобразователей

С учетом того, что сапфир можно жестко соединить пайкой высокотемпературным припоем с титаном и его сплавами [49], в отечественных ТП силы и давления используются в основном двухслойные мембранные упругие элементы, изготовленные из титанового сплава с напаянными на них ПЧЭ на основе КНС [50]. Схематически конструкции ТП давления, разработанных в промышленной группе МИДА [10], показаны на рис. 18. Достоинствами ТП с двухслойными мембранами (а–в) являются: высокая прочность и надежность

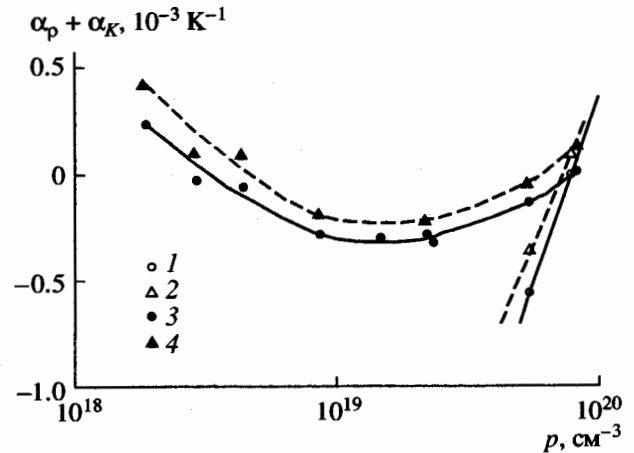


Рис. 16. Зависимость суммы  $(\alpha_p + \alpha_K)$  от концентрации дырок в слое  $p$ -КНС для низкотемпературной (1, 2), и высокотемпературной (3, 4) зон области ДТИП при различных значениях геометрического фактора:  $b/d \geq 60$  (1, 3);  $b/d = 4 \dots 8$  (2, 4).

упругого элемента; простота изготовления ТП на разные пределы измерений; возможность изготовления ТП с открытой мембраной; использование во всех конструкциях ТП унифицированного плоского ПЧЭ. Двухмембранные ТП (б, в) позволяют изготавливать мембрану, воспринимающую давление, также из других материалов, отличных от титана (например, из нержавеющей стали), что расширяет возможности создания ТП давления агрессивных сред. Вместе с тем большая разница в температурных коэффициентах расширения титана и сапфира ведет к дополнительной температурной деформации ПЧЭ и, как следствие, к дополнительной температурной погрешности ТП из-за возникающей температурной зависимости начального выходного сигнала мостовой тензосхемы, а технология пайки ПЧЭ ограничивает выбор материала для упругого элемента ТП.

На рис. 18г показан ТП давления, в котором упругим элементом служит сапфировая мембрана (т.е. сам ПЧЭ на основе КНС), жестко соединенная высокотемпературным стеклоприпоем с керамическим кольцом (для датчиков избыточного давления) или с керамической чашкой (для датчиков абсолютного давления). Благодаря близости температурных коэффициентов расширения алюмосиликатной керамики и лейкосапфира в кристаллографической плоскости (0112), в таких ТП температурная зависимость начального выходного сигнала намного меньше, чем в ТП с двухслойными мембранами. Однако для ТП с разными пределами измерения требуются ПЧЭ разной толщины, и, как показано в [51], нелинейность таких ТП может быть сделана достаточно малой только при подаче давления со стороны

тензосхемы и при определенных конфигурации и соотношениях размеров мембраны. Тем не менее такие ТП могут успешно применяться, например, в высокоточных барометрах.

Типичная топология ПЧЭ для ТП давления показана на рис. 19. Наличие твердой сапфировой подложки позволяет изготавливать тензочувствительную схему в виде замкнутого моста с элементами балансировки мостовой схемы, изготовленными из кремния. Замкнутый мост позволяет устранить влияние контактных сопротивлений металл-кремний, а использование балансировочных резисторов из того же материала, что и тензорезисторы, улучшает температурные характеристики ТП. При разработке оптимальной топологии ПЧЭ, обеспечивающей высокие метрологические характеристики ТП, необходимо учитывать степень легирования кремния, расположение и форму тензорезисторов (включая геометрический фактор), а также форму области, занимаемой тензосхемой (даже в достаточно больших по площади участках кремния термические напряжения могут быть анизотропными в зависимости от формы этих участков (рис. 20) [25]. Поскольку в ПЧЭ на основе КНС используется однородный слой кремния, достаточно сложную топологию тензочувствительной схемы можно рассчитать методом конечных элементов, используя уравнение Пуассона. Это позволяет проектировать топологию тензомоста с малой величиной начального выходного сигнала мостовой схемы и заданной чувствительностью резисторов дополнительной балансировки [52].

В ТП давления на основе КНС, рекламируемых зарубежными фирмами, используются либо двухслойные мембранные упругие элементы из титана и сапфира, соединенных стеклоприпоем [18], либо мембраны из сапфира, соединенные с корпусом из нержавеющей стали [16].

#### Б. Основная погрешность тензорезисторных преобразователей

Основными метрологическими характеристиками ТП являются нелинейность, вариация и повторяемость функции преобразования механической величины в электрический выходной сигнал тензомоста. Нелинейность зависит как от формы упругого элемента ТП (нелинейность механического преобразования), так и от расположения тензорезисторов относительно деформации (нелинейность механоэлектрического преобразования). На рис. 21 [38] приведены температурные зависимости нелинейности выходного сигнала ТП силы с балочным ПЧЭ (тензорезисторы расположены вдоль и поперек балки) и ТП давления с мембранным ПЧЭ с топологией, показанной на рис. 19. Как видно, у мембранных ТП нелинейность практически постоянна во всем возможном

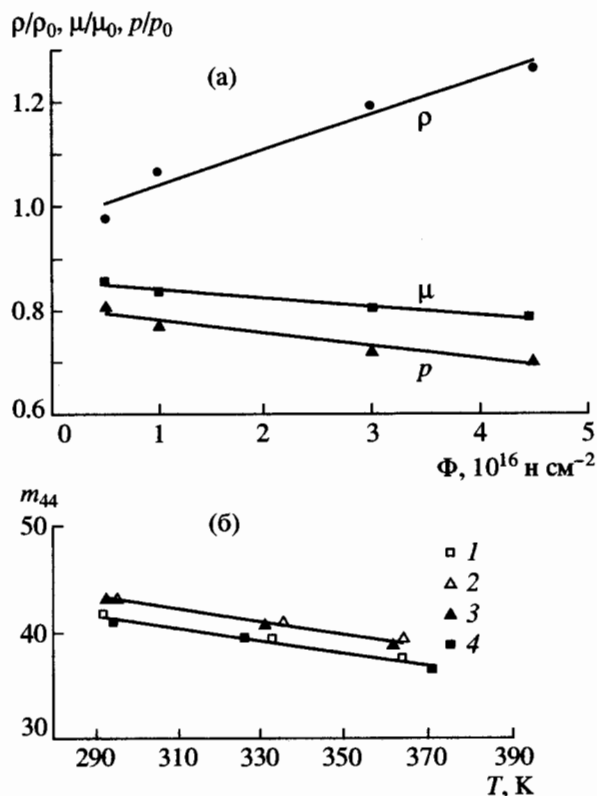
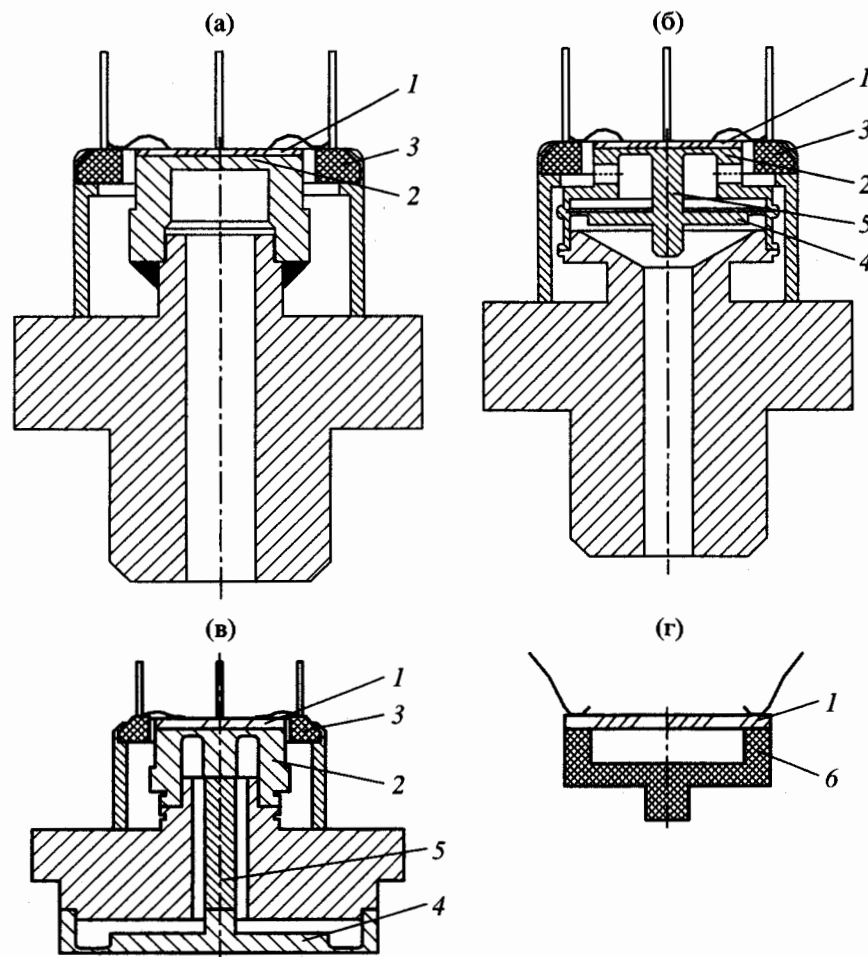


Рис. 17. Зависимость относительного изменения удельного сопротивления  $\rho$ , концентрации  $p$  и подвижности  $\mu$  дырок в  $p$ -КНС от флюенса нейтронов;  $T = 300$  К,  $p_0 = 6 \times 10^{19}$   $\text{см}^{-3}$  (а); температурная зависимость коэффициента эластосопротивления  $m_{44}$  в  $p$ -КНС при реакторном облучении;  $p_0 = 5 \times 10^{19}$   $\text{см}^{-3}$ ;  $\Phi, 10^{16}$  н/см<sup>2</sup>: 0 (1, 2); 0.5 (3); 4.5 (4).

рабочем интервале температур, что позволяет использовать одни и те же ПЧЭ для создания ТП давления криогенных и высокотемпературных сред. На рис. 22а показано распределение значений нелинейности серийных датчиков давления МИДА-ДИ-13П (при комнатной температуре) с разными диапазонами измерения. Видно, что для абсолютного большинства датчиков (и, соответственно, ТП) нелинейность не превышает 0.1%.

Если нелинейность ТП может быть в принципе скорректирована электронной схемой датчика, то вариация и повторяемость являются параметрами, не допускающими корректировку. Использование монокристаллического ПЧЭ, дисперсионно-твердеющего титанового сплава с высокими упругими характеристиками и жесткого припоя позволяет получить ТП с малыми значениями вариации (рис. 22б). Повторяемость характеристик ТП не превышает 0.02...0.04% от диапазона измерений.



**Рис. 18.** Основные конструктивные схемы тензопреобразователей давления: одномембранный (а) и двухмембранные (б, в) двухслойные ТП избыточного давления и однослойный ТП абсолютного давления (г): 1 – ПЧЭ на основе КНС; 2 – металлическая измерительная мембрана; 3 – коллектор; 4 – металлическая воспринимающая мембрана; 5 – шток; 6 – керамическое основание.

Судя по рекламным данным, точность зарубежных датчиков давления на основе КНС (сумма нелинейности, вариации и повторяемости) составляет  $\pm 0.25\%$  [16–18].

### *В. Температурная погрешность тензорезисторных преобразователей*

Одной из основных составляющих погрешности полупроводниковых тензопреобразователей механических величин является температурная зависимость начального выходного сигнала (“нуля”) и чувствительности ТП. В ТП на основе КНС с двухслойными мембранами основным источником температурного дрейфа нуля являются термические деформации ПЧЭ, жестко соединенного с титановой мембраной. Источниками температурного дрейфа чувствительности (в зависимости от способа питания моста (5), (6)) являются температурные изменения сопротивления и чувстви-

тельности мостовой тензосхемы, а также температурная зависимость упругих характеристик ТП.

Наиболее эффективны физико-технологические и конструктивно-технологические методы коррекции температурных погрешностей ТП, поскольку они не требуют индивидуальной работы с каждым прибором. К числу таких методов относятся оптимизация топологии тензочувствительной мостовой схемы ПЧЭ (выбор места расположения и формы тензорезисторов) и оптимизация степени легирования слоя кремния. К сожалению, на современном этапе развития технологии КНС полное использование этих методов невозможно, поэтому для дополнительного снижения температурных погрешностей ТП используются различные пассивные и активные электронные схемы. Разработке различных схемотехнических методов коррекции температурной погрешности ТП посвящено большое количество работ (см., например, 54)]. В ПГ МИДА для коррекции темпе-

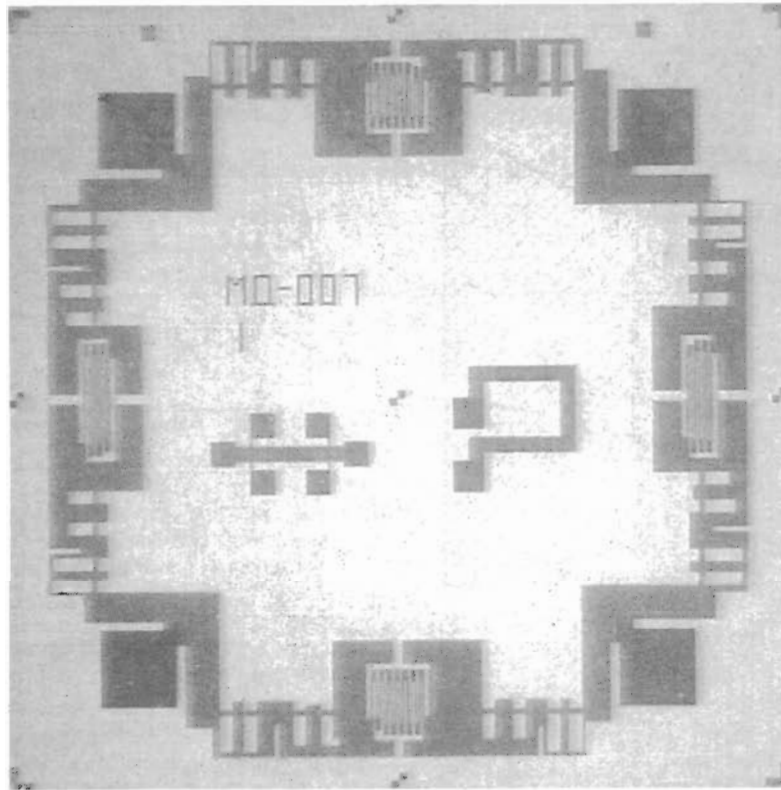


Рис. 19. Топология ПЧЭ на основе КНС для тензопреобразователя давления.

ратурных погрешностей используются пассивные схемы с термнезависимыми резисторами [55], а также электронные схемы с цифровой обработкой сигнала. Использование в схемах коррекции термнезависимых резисторов позволяет не заботиться о равенстве температур ПЧЭ и корректирующих элементов, а также о величине температурных коэффициентов этих элементов, и располагать их в любом удобном месте – непосредственно на ТП или на печатной плате электронного блока датчика, – что особенно важно при измерениях давления высокотемпературных сред.

Коррекция температурного дрейфа нуля может быть проведена схемотехнически включением термнезависимого резистора параллельно одному из плеч моста с последующей балансировкой моста дополнительными резисторами на ПЧЭ [55]. При питании мостовой тензосхемы ТП постоянным током эта же коррекция может быть достигнута установкой с помощью балансировочных резисторов определенного расчетного значения начального выходного сигнала, которое в этом случае не зависит от температуры [56].

Для коррекции температурного дрейфа чувствительности ТП можно воспользоваться явлением ДТИП, когда в определенных интервалах температур выполняется условие (7). При этом чувствительность ТП не зависит от температуры, т.е.

мы можем говорить о “самокомпенсации” температурной погрешности чувствительности ТП. На рис. 23 [61] представлены температурные дрейфы чувствительности ТП при разных удельных сопротивлениях кремния. Как видно, при  $\rho = 0.0026 \text{ Ом см}$  изменение чувствительности ТП в интервале температур  $-70 \dots + 400^\circ\text{C}$  не превышает 1%, а при  $\rho = 0.0029 \text{ Ом см}$  чувствительность практически постоянна в интервале  $200\text{--}400^\circ\text{C}$ . Такие “самокомпенсированные” ТП защищены авторским свидетельством и патентами [57–60].

Однако практическое использование явления самокомпенсации температурной погрешности чувствительности наталкивается на два препятствия. Во-первых, как следует из данных рис. 23, отклонение величины удельного сопротивления всего на 10% от оптимальной приводит к резкому увеличению температурной погрешности преобразования, а легирование слоя  $p$ -КНС с лучшей точностью практически недостижимо для современной технологии выращивания КНС. Во-вторых, точная величина оптимального удельного сопротивления зависит от температурного коэффициента упругого преобразования  $\alpha_e$ , который определяется как материалом, так и конструкцией ТП. Поэтому для каждой конструкции ТП и для каждого диапазона измерений существует, вообще говоря, свой оптимальный уровень легирования

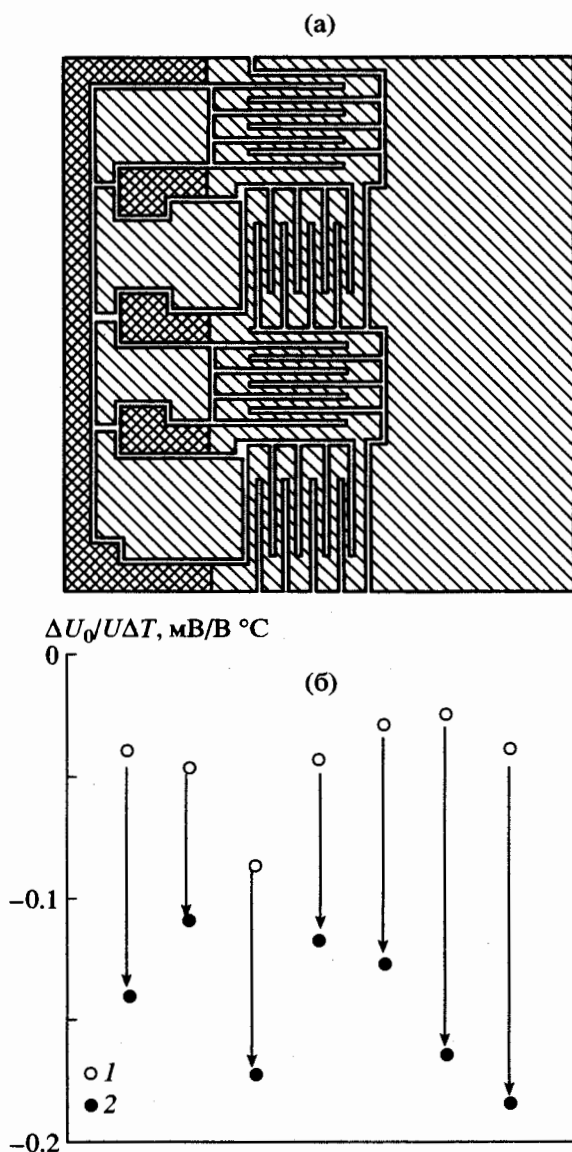


Рис. 20. Мостовая тензочувствительная схема на балочном ПЧЭ из КНС с дополнительными участками слоя кремния (а) и температурный дрейф нуля тензосхемы до (1) и после (2) удаления дополнительных участков слоя кремния (б), для семи образцов.

КНС. Практически для компенсации температурной зависимости чувствительности ТП при питании тензомоста постоянным током выбирают степень легирования  $p$ -КНС несколько выше оптимальной, а коррекцию остаточной температурной зависимости осуществляют подключением параллельно питающей диагонали моста термонеинвариантного резистора [55].

Во многих случаях для измерения давления требуются преобразователи, питание которых осуществляется постоянным напряжением. Тогда целесообразно использовать структуры  $p$ -КНС с более

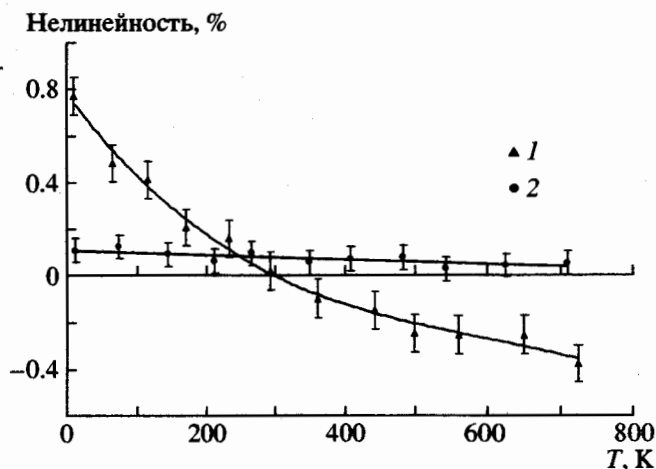


Рис. 21. Температурная зависимость нелинейности выходного сигнала ТП силы с балочным ПЧЭ (1) и ТП давления с мембранным ПЧЭ (2) на основе  $p$ -КНС.

высокой степенью легирования, имеющие меньший температурный коэффициент тензочувствительности. При этом компенсация температурного дрейфа чувствительности ТП осуществляется последовательным включением термонеинвариантного резистора и питающей диагонали тензомоста [55].

При определении температурной погрешности преобразования ТП необходимо учитывать, что из-за нелинейных зависимостей характеристик ПЧЭ температурные зависимости начального выходного сигнала и чувствительности ТП также обычно оказываются нелинейными. Например, для ТП давления на основе КНС, компенсированных с помощью термонеинвариантных резисторов, эти зависимости близки к параболическим (рис. 24). Поэтому для ТП с полупроводниковыми ПЧЭ, как правило, неприменимо широко распространенное нормирование температурной погрешности с указанием линейного коэффициента температурной зависимости начального выходного сигнала и чувствительности [16–18, 62]. Правильнее в этом случае указывать зону дополнительной температурной погрешности преобразования ТП в рабочем интервале температур [63]. На рис. 25 показаны данные по зоне суммарной дополнительной температурной погрешности датчиков МИДА-13П (включающей наряду с погрешностью ТП и температурную погрешность электронного блока) [53].

На рис. 26 приведено статистическое распределение зоны суммарной температурной погрешности датчиков давления, в которых использованы ТП, оптимизированные для питания постоянным током (МИДА-01П) или постоянным напряжением (МИДА-13П), при компенсации термонеинвариантными резисторами. Как видно, при этом методе коррекции дополнительные температурные по-

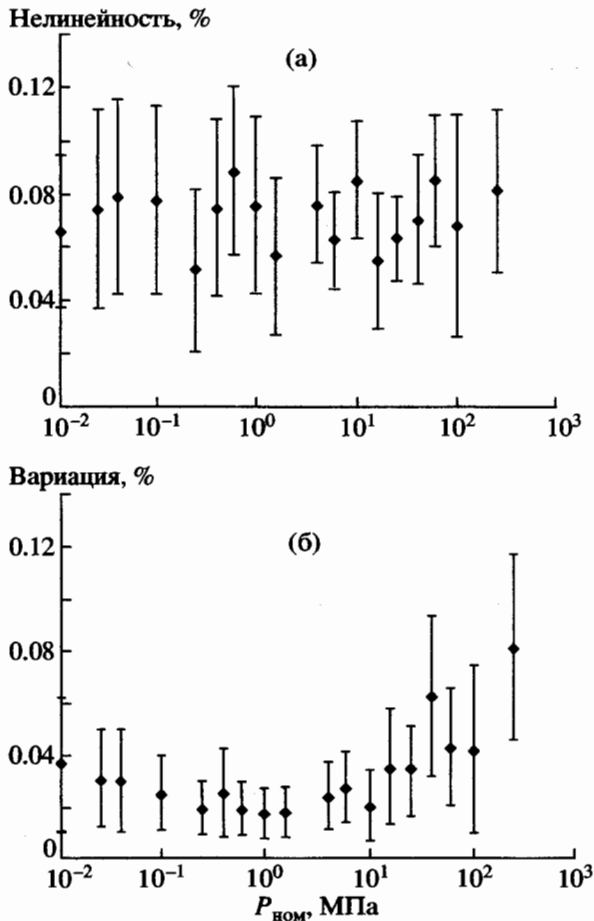


Рис. 22. Среднее значение и дисперсия нелинейности (а) и вариации (б) датчиков МИДА-ДИ-13П с различными диапазонами измерения (величина выборки 15 тыс. шт.) [53].

грешности ТП могут быть сделаны достаточно малыми и практически одинаковыми независимо от способа их питания.

Параболическая температурная зависимость выходного сигнала ТП позволяет достаточно просто проводить дополнительную коррекцию температурной погрешности ТП с помощью цифровой обработки. В результате суммарная погрешность измерения датчиков давления МИДА-13П-К в диапазоне температур  $-40...+80^{\circ}\text{C}$  не превышает 0.25% (рис. 27) [53].

#### Г. Стабильность тензорезисторных преобразователей

Одним из важнейших требований, предъявляемых к преобразователям физических величин, является стабильность их характеристик. Особенно важен этот параметр при работе на объектах, где периодическая калибровка датчиков либо затруд-

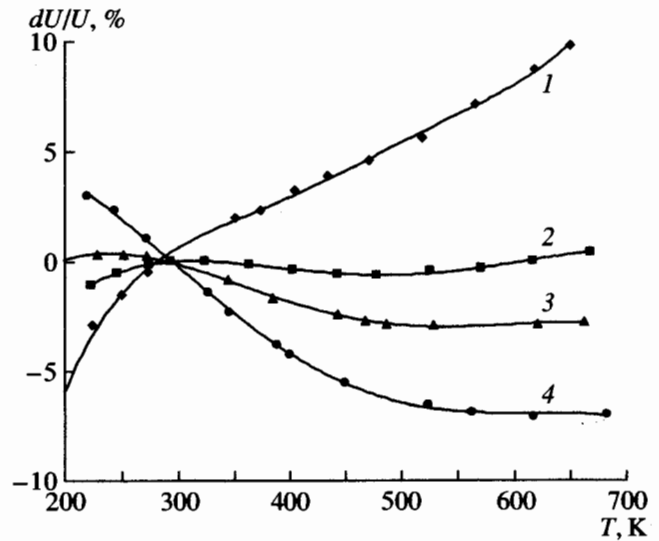


Рис. 23. Температурные зависимости относительного изменения чувствительности ТП давления с двухслойным упругим элементом; удельное сопротивление кремния:  $2.3 \times 10^{-3}$  (1),  $2.6 \times 10^{-3}$  (2),  $2.9 \times 10^{-3}$  (3),  $3.8 \times 10^{-3}$  Ом см (4).

нена, либо невозможна (первые контуры АЭС, космические объекты и т.д.). Вместе с тем этот параметр является и наиболее неопределенным, поскольку стабильность характеристик решающим образом зависит от условий эксплуатации датчиков. Очевидно, что изменения характеристик в течение года (например, датчиков давления после хранения на складе или при работе при постоянном давлении и комнатной температуре, или на открытом воздухе в условиях сильно меняющегося давления) будут совершенно различными. К сожалению, большинство изготовителей не сообщает условия эксплуатации, при которых определяется стабильность характеристик ТП.

Учитывая, что одним из факторов, наиболее заметно влияющих на характеристики ТП давления, является периодическое изменение температуры (термоциклы), в ПГ МИДА регулярно проводятся измерения стабильности характеристик ТП и датчиков давления в результате термоциклирования в рабочем диапазоне температур. Типичные результаты изменения параметров ТП после 250 термоциклов при  $T = -40...+80^{\circ}\text{C}$  (в % от диапазона изменения выходного сигнала) приведены ниже.

Начальный выходной сигнал	$\pm 0.1$
Чувствительность	$\pm 0.05$
Нелинейность	$\pm 0.03$
Вариация	$\pm 0.02$
Повторяемость	$\pm 0.03$
Точность	$\pm 0.05$



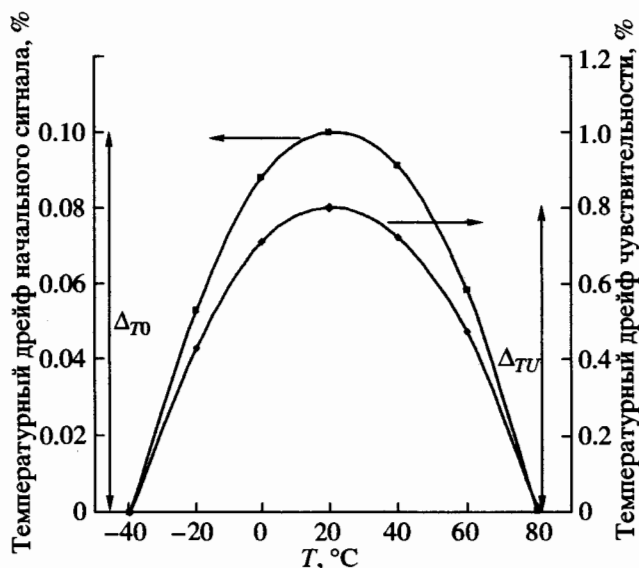


Рис. 24. Типичные температурные зависимости начального сигнала и чувствительности ТП давления с ПЧЭ на основе КНС при питании напряжением после компенсации; линии – параболы;  $\Delta T_0$  и  $\Delta T_1$  – зоны температурной погрешности начального выходного сигнала и чувствительности соответственно.

Как видно, наименее стабилен начальный выходной сигнал ТП, тогда как чувствительность и точность (сумма нелинейности, вариации и повторяемости) практически не изменяется.

#### Д. Высокотемпературные тензорезисторные преобразователи и датчики давления

Одним из главных достоинств ТП с ПЧЭ на основе КНС является возможность измерения ими механических величин в условиях высоких температур. Теоретически температура ПЧЭ может достигать  $\sim 600...700^\circ\text{C}$ , когда начинается заметная пластическая деформация кремния [64]. Однако на практике такая температура пока недостижима из-за ряда технологических ограничений. По-видимому, в настоящее время максимальная температура ПЧЭ на основе КНС достигает  $400^\circ\text{C}$  [16]. В датчиках давления высокотемпературных сред МИДА-ДИ-12П-12 температура измеряемой среды (совпадающая с температурой ПЧЭ) может достигать  $350^\circ\text{C}$  [10].

Использование двухмембранных ТП позволяет существенно увеличить допустимую температуру измеряемой среды; так, например, в ТП давления газов в цилиндрах мощных дизелей МИДА-ДИ-55П температура измеряемых газов может достигать  $500...600^\circ\text{C}$ , тогда как температура ПЧЭ при этом не превышает  $250^\circ\text{C}$ . Двухмембранные ТП позволяют измерять давление вязких и



Рис. 25. Среднее значение и дисперсия зоны суммарной температурной погрешности датчиков МИДА-ДИ-13П в интервале температур  $-40...+80^\circ\text{C}$  для разных диапазонов измерения.

кристаллизующихся сред, в том числе давление расплавов полимеров в экструдерах при производстве синтетических волокон и изделий из пластмасс. В широко используемых датчиках фирмы “Dynisco” [65] давление расплава передается через капилляр, заполненный ртутью, к ТП, находящемуся при комнатной температуре. В аналогичных датчиках МИДА-ДИ-12П-083 отсутствует ртуть; давление преобразуется воспринимающей мембраной в силу, которая измеряется мембранным преобразователем силы, соединенным с воспринимающей мембраной штоком (рис. 16в). В результате датчик становится абсолютно экологически безопасным и может быть использован в пищевой и фармацевтической промышленности.

Поскольку при высокотемпературных технологических процессах температура измеряемой среды изменяется, как правило, в небольших пределах, датчики давления высокотемпературных сред МИДА-12П калибруются при температуре, соответствующей рабочей температуре среды. Это позволяет практически исключить дополнительную температурную погрешность, возникающую при нагреве среды от комнатной температуры до рабочей. Дополнительная температурная погрешность в пределах 100-градусной зоны вокруг температуры калибровки осуществляется термонеинdependent резисторами, находящимися в низкотемпературной зоне. В результате основная погрешность высокотемпературных ТП не превышает  $0.2...0.5\%$ , а дополнительная температурная погрешность в 100-градусном интервале –  $3\%$ .

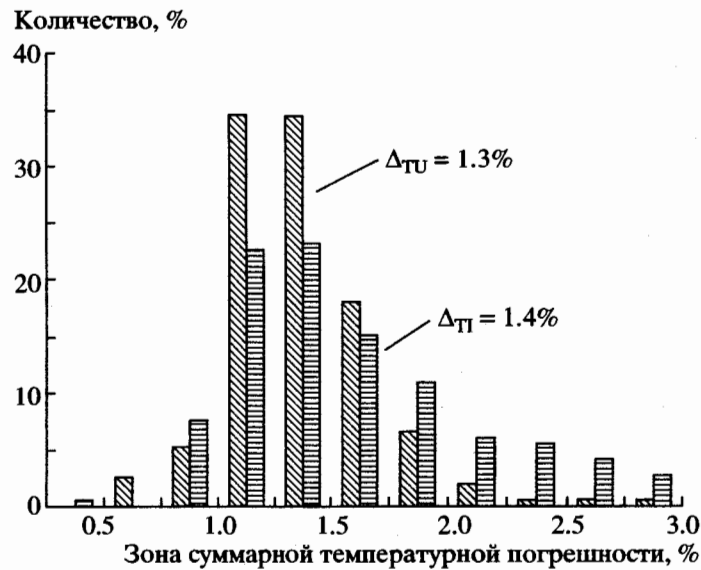


Рис. 26. Зона суммарной температурной погрешности датчиков МИДА-01П (питание постоянным током) и МИДА-13П (питание постоянным напряжением) в диапазоне температур  $-40\dots+80$  С [55].

### Е. Тензорезисторные преобразователи давления криогенных сред

При измерениях давления криогенных жидкостей и газов возникают две основные проблемы — трудности с выводом давления в зону умеренных температур для измерения его обычными датчиками и возникновение в таких “теплых тупиках” значительных колебаний давления, иногда делающих невозможными точные измерения [40]. Исследования тензорезистивного эффекта в структурах КНС показали возможность создания ТП давления, работоспособных при температурах вплоть до жидкого гелия [66]. Опытные образцы таких ТП показали высокие метрологические характеристики: нелинейность в диапазоне температур  $2\dots300$  К не превысила 0.3%, вариация — 0.1% [67]. Магнитное поле до 9 Тл практически

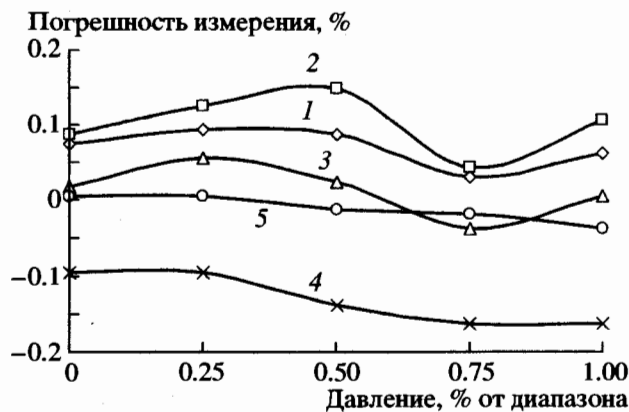


Рис. 27. Погрешность измерения давления датчиком МИДА-ДИ-13П-К в диапазоне температур  $-40\dots+80$ °С:  $-40$  (1),  $-20$  (2),  $20$  (3),  $50$  (4) и  $80$ °С (5).

линейно изменяет выходной сигнал ТП; чувствительность к магнитному полю не превышает 0.05%/Тл [67]. Выбирая оптимальное удельное сопротивление  $p$ -КНС и питая ТП постоянным напряжением, можно получить ТП давления, в которых зона изменения чувствительности в диапазоне температур  $2\dots77$  К не превышает 0.2%, а при необходимости работы в широком диапазоне температур ( $2\dots300$  К) эту зону можно сделать не более 4% (рис. 28).

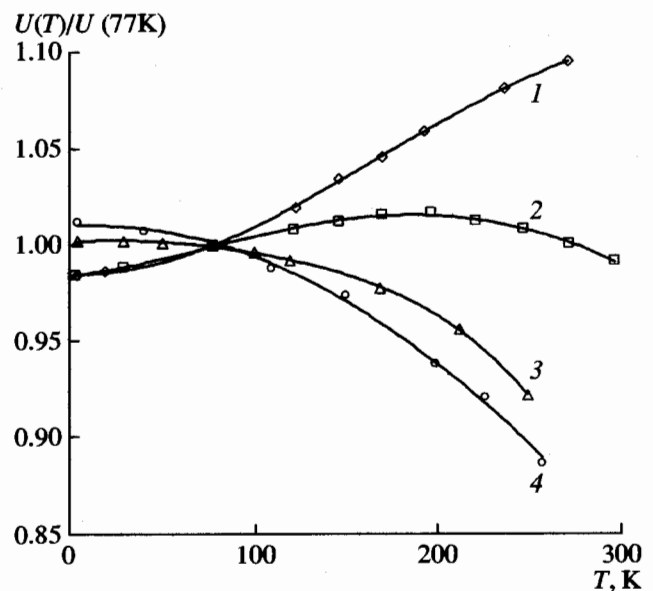


Рис. 28. Температурная зависимость чувствительности ТП давления криогенных сред при разных уровнях легирования структур КНС:  $p = 2.4 \times 10^{20}$  (1),  $1.4 \times 10^{20}$  (2),  $7.2 \times 10^{19}$  (3) и  $6 \times 10^{19}$  см (4) [12, 67].



## 6. ПЕРСПЕКТИВЫ ДАЛЬНЕЙШЕГО СОВЕРШЕНСТВОВАНИЯ ТЕНЗОРЕЗИСТОРНЫХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ НА ОСНОВЕ КНС

Метрологические и эксплуатационные характеристики тензорезисторных ТП механических величин с ПЧЭ на основе структур КНС продолжают постоянно совершенствоваться. Достаточно сказать, что если в комплексе датчиков тепло-энергетических параметров "Сапфир-22" основная погрешность датчиков давления составляла не менее 0.25%, а мембранные ТП применялись для измерения давления не ниже 100 кПа (для измерения меньших давлений использовались мембранно-рычажные ТП, соединенные с воспринимающими мембранами), то в общепромышленных датчиках МИДА-13П основная погрешность уменьшена до 0.15% (при том, что точность ТП – комбинация нелинейности, вариации и повторяемости – составляет не более 0.1%), а нижний предел измерения датчиков с мембранными ТП составляет 4 кПа.

Вместе с тем имеется ряд направлений, по которым можно вести дальнейшее совершенствование характеристик ТП. Во-первых, это создание математической модели ТП с ПЧЭ на основе КНС, которая позволила бы оптимизировать конструкцию ТП с точки зрения как упругих элементов, так и топологии тензочувствительной схемы. Например, в [68] было показано, что в мембранных ТП деформации поверхности не обращаются в нуль за радиусом мембраны, а при достаточно толстых мембранах максимальная чувствительность тензосхемы достигается при размещении тензорезисторов за границей упругой мембраны. Однако достаточно точной математической модели, описывающей деформации давлением поверхности многослойной толстой мембраны, выполненной в единой конструкции с опорным кольцом, до сих пор не существует. Не существует также и модели термических напряжений на поверхности сапфирового ПЧЭ в ТП, возникающих при остывании ТП после пайки ПЧЭ в результате разницы в коэффициентах термического расширения сапфира и титана. Создание таких моделей осложняется необходимостью учета анизотропии механических характеристик сапфира [69].

Во-вторых, принципиально температуру ТП можно довести до 500...600°C, тогда как пока она не превышает 350...400°C. Однако практически такое повышение рабочей температуры требует разработки технологии надежных высокотемпературных омических контактов к кремнию – проблема, которой из-за отсутствия необходимости никто не занимался.

В-третьих, большой интерес представляют преобразователи давления криогенных сред. Принципиальная возможность создания таких преобразователей с ПЧЭ на основе КНС показана достаточно давно, но для создания серийных приборов необходимо выполнить ряд исследований и разработок.

Хотя титан и его сплавы являются достаточно коррозионностойким материалом, тем не менее для измерения давления некоторых агрессивных сред (например, кислород, водород и др.) его использовать нельзя. Двухмембранные преобразователи дают принципиальную возможность использовать для элементов, контактирующих с измеряемой средой, другие материалы, например, нержавеющие стали, что существенно расширяет область применения ТП давления. Однако для практической реализации таких ТП необходимо решить задачу надежного соединения нержавеющих сталей с титановыми сплавами при сохранении высоких упругих характеристик составной конструкции.

Таковы некоторые направления работ, которые позволят существенно расширить область применения тензорезисторных чувствительных элементов на основе структур КНС для измерения механических величин.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Папков В.С., Цыбульников М.Б. Эпитаксиальные кремниевые слои на диэлектрических подложках и приборы на их основе. М.: Энергия, 1979.
2. НПП Сапфир // [www.sapfir.ru/science.htm](http://www.sapfir.ru/science.htm).
3. Dynex Semiconductor // [www.dynexsemi.com/products/sos/index.htm](http://www.dynexsemi.com/products/sos/index.htm).
4. Andreou A.G., Kalayjian Z.K., Apsel A. et al. // IEEE Circuits & Systems Mag. 2001. V. 1. № 3. P. 22.
5. Ксенофонтов М.Е. // Приборы и системы управления. 1970. № 3. С. 61.
6. Ксенофонтов М.Е., Суровиков М.В. // Приборы точной механики и технология приборостроения. 1972. № 2. С. 176.
7. Кенигсберг В.Л., Сердюков В.И., Мильман С.И. и др. // Приборы и системы управления. 1974. № 7. С. 26.
8. Кенигсберг В.Л., Стучебников В.М., Сердюков В.И. и др. // Измерительная техника. 1978. № 10. С. 84.
9. Иордан Г.Г. // Измерительные преобразователи механических и тепловых величин на базе микроэлектроники. М.: МДНТП, 1980. С. 3.
10. Бушев В.В., Николайчук О.Л., Стучебников В.М. // Датчики и системы. 2000. № 1. С. 21.
11. Стучебников В.М. // Измерения, контроль, автоматизация. 1982. № 4. С. 15.

12. *Stuchebnikov V.M.* // Sensors and Actuators. Ser. A. 1991. V. 28. № 3. P. 207.
13. *Перепелицын О.П., Благодетелев С.В.* // Датчики и системы. 2002. № 10 (спецвыпуск). С. 20.
14. Комплекс датчиков давления “Метран-100” // Датчики и системы. 2003. № 10. С. 46.
15. *Коломиец Л.Н.* // Датчики и системы. 2001. № 10. С. 44.
16. *Sensonetics, Inc.* Silicon on sapphire pressure transducers // [www.sensonetics.com/series400.pdf](http://www.sensonetics.com/series400.pdf).
17. Pressure sensors // [www.eldec.com/pressure\\_sensors.htm](http://www.eldec.com/pressure_sensors.htm).
18. PX4200-5V; Silicon on a Sapphire Pressure Pransducer, Outstanding Performance and Stability // [www.omega.com/pptst/PX4200-5V.html](http://www.omega.com/pptst/PX4200-5V.html).
19. *Manasevit A.M.* // J. Cryst. Growth. 1974. V. 22. № 2. P. 125.
20. *Пивоненков Б.И., Стучебников В.М.* // Приборы и системы управления. 1976. № 1. С. 20.
21. *Maurits J.E.A.* // Sol. St. Tech. 1977. V. 20. № 4. P. 81.
22. *Стучебников В.М.* // Обзоры по электронной технике. Сер. 6. Материалы. М.: ЦНИИЭлектроника, 1980. Вып. 2.
23. *Стучебников В.М., Папков В.С.* // Электронная пром-ть. 1980. № 8. С. 71.
24. *Abrahams M.S., Buiocchi C.J.* // Appl. Phys. Lett. 1975. V. 27. № 6. P. 325.
25. *Стучебников В.М.* Разработка и исследование оптимизированных интегральных чувствительных элементов тензопреобразователей механических величин // Дис. ... докт. техн. наук. М.: НИИТеплоприбор, 1986. 437 с.
26. *Dumin D.J., Robinson P.H.* // J. Appl. Phys. 1968. V. 39. № 6. P. 2759.
27. *Thurber W.R., Mattis R.L., Liu Y.M.* // Semiconductor Characterization Techniques. Proc. Top. Conf. Charact. Techn. Semicond. Mater. and Devices. Seatle, Wash., 1978. Princeton, N.J., 1978. P. 81.
28. *Thurber W.R., Mattis R.L., Liu Y.M.* // J. Electrochem. Soc. 1980. V. 127. № 10. P. 2291.
29. *Dutta D.N.* // Phys. Stat. Solidi. 1962. V. 2. № 8. P. 984.
30. *Lyon K.G., Salinger G.L., Swenson C.A., White G.K.* // J. Appl. Phys. 1977. V. 48. № 3. P. 865.
31. *Watchman J.B., Jr., Scudrei T.G., Cleek G.W.* // J. Am. Ceram. Soc. 1962. V. 45. № 7. P. 319.
32. *Jefkins D.M.* // J. Phys. D: Appl. Phys. 1970. V. 3. № 5. P. 770.
33. *Dumin D.J.* // J. Appl. Phys. 1965. V. 36. № 9. P. 2700.
34. *Папков В.С., Папков Н.С.* // Электрон. техника. Сер. Материалы. 1977. № 7. С. 67.
35. *Стучебников В.М., Суханов В.И., Хасиков В.В.* // Приборы и системы управления. 1983. № 1. С. 83.
36. *Лурье Г.И., Стучебников В.М.* // Электрон. техника. Сер. Материалы. 1984. № 1. С. 16.
37. *Лурье Г.И., Стучебников В.М., Суханов В.И.* // Теоретические и экспериментальные исследования в области создания полупроводниковых измерительных преобразователей // Сб. научн. трудов. М.: НИИТеплоприбор, 1986. С. 3.
38. *Лурье Г.И., Стучебников В.М., Суханов В.И.* // Там же. С. 15.
39. *Wilner L.B.* // ISA Trans. 1978. V. 17. № 1. P. 83.
40. *Лурье Г.И., Стучебников В.М.* // Измерения, контроль, автоматизация. 1989. № 2. С. 18.
41. *Abrahams M.S., Blanc J., Buiocchi C.J., Yfm W.E.* // J. Appl. Phys. 1978. V. 49. № 2. P. 652.
42. *Стучебников В.М.* // Приборы и системы управления. 1982. № 6. С. 26.
43. *Белоглазов А.В., Стучебников В.М., Хасиков В.В., Черницын В.Н.* // ФТП. 1982. Т. 16. № 8. С. 1483.
44. *Стучебников В.М., Черницын В.Н.* // Теоретические и экспериментальные исследования в области создания новых измерительных преобразователей и вопросы автоматизированного проектирования // Сб. научн. трудов. М.: НИИТеплоприбор, 1985. С. 3.
45. *Евдокимов В.И., Стучебников В.М., Суханов В.И. и др.* // А.с. СССР № 1 404 850. Заявл. 03.07.1986. Б.И. 1988. № 23.
46. *Белоглазов А.А., Лазарева И.К., Стучебников В.М., Суханов В.И.* // Приборы и системы управления. 1982. № 8. С. 30.
47. *Коба Б.В., Литвинов В.Л., Очеретянский А.Л. и др.* // ФТП. 1985. Т. 19. № 6. С. 1017.
48. *Коба Б.В., Литвинов В.Л., Очеретянский А.Л. и др.* // Атомная энергия. 1985. Т. 59. Вып. 1. С. 58.
49. *Никифорова З.В., Румянцев С.Г., Киселевский С.Л., Евдокимов В.И.* // Сварочное производство. 1974. № 3. С. 35.
50. *Белоглазов А.В., Стучебников В.М., Хасиков В.В. и др.* // Приборы и системы управления. 1982. № 5. С. 21.
51. *Папков Н.С., Папков В.С., Стучебников В.М.* // Датчики и системы. 1999. № 5. С. 30.
52. *Пирогов А.В., Стучебников В.М.* // Проблемы автоматизации и управления в технических системах // Тр. межд. научно-техн. конф. Пенза 12–14 мая 2004. Пенза: ИИЦПГУ, 2004. С. 113.
53. *Бушев Е.Е., Николайчук О.Л., Стучебников В.М.* // Датчики и системы. 2004. № 6. С. 48.
54. *Ваганов В.И.* Интегральные тензопреобразователи. М.: Энергоатомиздат, 1983.
55. *Мартынов Д.Б., Стучебников В.М.* // Датчики и системы. 2002. № 10. С. 6.
56. *Лурье Г.И., Стучебников В.М., Суханов В.И., Ячук Д.А.* // А.с. СССР № 1411571. Заявл. 06.06.1986. Б.И. 1988. № 27.
57. *Белоглазов А.В., Бейден В.Е., Иордан Г.Г. и др.* // А.с. СССР № 934257. Заявл. 20.02.1978. Б.И. 1982. № 21.
58. Semiconductor strain gauge transducer // Пат. США № 4373399, 1983.
59. Transducteur extensometrique a semiconducteurs // Пат. Франции № 8027919, 1983.

60. *Halbleiterdehnungsumformer* // Пат. ГДР № 156488, 1982.
61. *Стучебников В.М.* // Датчики систем измерения, контроля и управления // Межвуз. сб. науч. трудов. Пенза.: Пенз. политехн. ин-т, 1985. С. 18.
62. Датчики давления, разрежения и разности давлений с электрическими аналоговыми выходными сигналами ГСП. Общие технические условия / ГОСТ 22520-85 (СТ СЭВ 4124-83).
63. *Стучебников В.М.* // Датчики и системы. 2004. № 9. С. 15.
64. *Концевой Ю.А., Литвинов Ю.М., Фаттахов Э.А.* Пластичность и прочность полупроводниковых материалов и структур. М.: Радио и связь, 1982.
65. Dynisco: your melt pressure transducer // [www.dynisco.com](http://www.dynisco.com).
66. *Лурье Г.И., Стучебников В.М., Хасиков В.В.* // Приборы и системы управления. 1981. № 98. С. 20.
67. *Евдокимов В.И., Лурье Г.И., Стучебников В.М.* // Приборы и системы управления. 1985. № 5. С. 19.
68. *Белоглазов А.В., Евдокимов В.И., Котляревская Е.Б. и др.* // А.с. СССР № 1525505. Заявл. 10.05.1988. Б.И. 1989. № 44.
69. *Стучебников В.М.* // Приборы и системы управления. 1983. № 6. С. 40.