

Тензорезисторные преобразователи на основе гетерозепитаксиальных структур «кремний на сапфире»

Канд. физ.-мат. наук В. М. СТУЧЕБНИКОВ

Тензорезистивный принцип преобразования широко используется в датчиках разнообразных механических величин благодаря высокой точности и относительной простоте конструкции приборов, реализующих этот принцип. Открытие и всестороннее исследование тензорезистивного эффекта в полупроводниковых материалах, в первую очередь кремнии, положили начало созданию нового типа тензорезисторных датчиков с полупроводниковыми чувствительными элементами (ПЧЭ), характеризующимися высокой чувствительностью, надежностью, малыми габаритами и высокопроизводительной технологией изготовления. Появившись в начале 60-х годов, полупроводниковые тензорезисторные датчики в своем развитии прошли ряд этапов от использования наклеиваемых кремниевых тензорезисторов [1, 2] до интегральных ПЧЭ с диффузионными тензорезисторами и выполненными в них схемами преобразования сигнала и компенсации погрешностей датчика [3].

Метрологические характеристики тензорезисторного датчика определяются главным образом параметрами его основной части - тензопреобразователя (ТП), осуществляющего преобразование измеряемой механической величины в выходной электрический сигнал. Существенными недостатками полупроводниковых тензопреобразователей являются сильная и нелинейная температурная зависимость таких характеристик ПЧЭ, как тензочувствительность и сопротивление тензорезисторов, и нелинейность функции преобразования деформации в относительное изменение сопротивления тензорезисторов. Для борьбы с этими недостатками разработано большое количество конструктивных и схемных методов компенсации погрешностей ТП, позволяющих изготавливать в настоящее время датчики, работающие в интервале температур от -50 до $+125^\circ\text{C}$ с основной погрешностью $0,5\%$ и дополнительной температурной погрешностью $0,1 - 0,4\%$ на каждые 10°C . Вместе с тем, трудоемкая индивидуальная настройка датчиков, необходимая для получения высоких метрологических характеристик, повышает их стоимость и ограничивает объем производства. К недостаткам наиболее широко используемых в последние годы интегральных кремниевых ПЧЭ следует отнести также необходимость формирования в них р-п -переходов, изолирующих тензорезисторы друг от друга и от подложки. Наличие р-п -переходов ограничивает верхнее значение рабочей температуры величиной $130 - 150^\circ\text{C}$ (для кремния), понижает стабильность характеристик датчиков, не позволяет обеспечить высокую радиационную стойкость ПЧЭ. Указанные недостатки обусловили ограниченность применения полупроводниковых тензорезисторных датчиков в современных системах контроля и управления технологическими процессами, хотя объем производства таких датчиков за рубежом непрерывно растет, что связано, в первую очередь, с массовым потреблением не очень точных, но сравнительно недорогих тензорезисторных датчиков автомобильной промышленностью [4].

Принципиально новые возможности в развитии тензорезисторных датчиков на основе ПЧЭ открылись с разработкой и исследованием гетерозепитаксиальных полупроводниковых структур типа «кремний на диэлектрике» [5]. Из них наиболее изучена и технологически освоена в производстве структура «кремний на сапфире» (КНС), представляющая собой тонкую монокристаллическую пленку кремния, выращенную на монокристаллической же сапфировой подложке с определенной кристаллографической ориентацией. Толщина кремниевой пленки варьируется от долей до нескольких микрон. При изготовлении ПЧЭ на структуре КНС формируют тензочувствительную схему, в которой тензорезисторы имеют вид мезоструктур, отделенных друг от друга промежутками чистого сапфира.

Тензопреобразователи с ПЧЭ на основе структур КНС обладают всеми достоинствами ТП с интегральными кремниевыми ПЧЭ, а именно: упругий элемент таких преобразователей может быть изготовлен из монокристалла диэлектрика, так что в нем отсутствуют гистерезис и усталостные явления; тензорезисторы монолитно связаны с упругим элементом, что исключает явления гистерезиса и ползучести, характерные для слоев связующего; ПЧЭ изготавливаются методами твердотельной технологии, что обеспечивает высокую воспроизводимость характеристик при массовом производстве. Вместе с тем, ПЧЭ на основе КНС имеют дополнительные преимущества, ибо сапфир прочнее и жестче кремния и в принципе позволяет работать с большим уровнем деформаций, чем в интегральных ПЧЭ; сапфир обладает отличными упругими и изолирующими свойствами вплоть до температур порядка 1000°C , что делает ПЧЭ на основе КНС работоспособными при высоких температурах (до начала пластических деформаций в кремнии, т. е. приблизительно до 700°C); сапфир химически и радиационно исключительно стоек, поэтому интегральные схемы на основе КНС могут работать в условиях высокой радиации [6]; наконец, в ПЧЭ на основе КНС отсутствует р-п -переход, а следовательно, существенно упрощается технология их изготовления и увеличивается выход годных изделий. Такие ПЧЭ работоспособны в самых жестких условиях эксплуатации при широком интервале рабочих температур и обладают повышенной надежностью и стабильностью параметров.

Детальные исследования особенностей электрофизических характеристик и тензоэффекта в структурах КНС показали, что на их основе можно создавать тензопреобразователи с малой температурной погрешностью и высокой линейностью преобразования, т. е. свободные от недостатков, принципиально присущих ТП с интегральными кремниевыми ПЧЭ. Первые сообщения о наращивании монокристаллических пленок кремния на сапфировых подложках появились в 1964 г. [5], работы по использованию структур КНС в

тензорезисторных ПЧЭ были начаты в Советском Союзе в конце 60-х годов [7, 8]. Уже в 1974 г. началось серийное производство разработанных НИИТеплоприбором (Москва) общепромышленных датчиков избыточного давления «Кристалл» с ПЧЭ на основе КНС [9]. С 1978 г. серийно выпускается комплекс взрывобезопасных измерительных преобразователей теплоэнергетических параметров «Сапфир» [10], а в 1980 г. НИИТеплоприбором завершена разработка комплекса общепромышленных высокоточных датчиков теплоэнергетических параметров «Сапфир-22». Высокими метрологическими характеристиками обладают ТП на основе структур КНС, успешно работающие при криогенных (до 4 К) [11] и высоких (до 450° С) [12] температурах. В последние годы структуры КНС рассматриваются как перспективный материал для разработки полупроводниковых ТП и за рубежом [13, 14]. Так, в конце 1979 г. появилось сообщение о создании американской фирмой Congas Corp. датчика абсолютного давления на основе КНС для использования при авиационных испытаниях [15].

ОСОБЕННОСТИ ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК И ТЕНЗОРЕЗИСТИВНОГО ЭФФЕКТА В СТРУКТУРАХ КНС

Для тензорезисторных ПЧЭ оптимальной является структура КНС с кристаллографической ориентацией плоскости подложки $(001)_{Si} // (1012)_{Al_2O_3}$. Структуры с такой ориентацией наиболее широко применяются в производстве интегральных схем, и их свойства изучены наиболее полно [5, 16]. По своим электрофизическим характеристикам они заметно отличаются от объемного и автоэпитаксиального кремния [16], что вызвано в основном двумя обстоятельствами: большим числом дефектов в пленке кремния из-за различия в типах и размерах кристаллических решеток кремния в сапфире и сильным термическим сжатием пленки кремния при остывании от температуры наращивания (~1000° С) из-за большого различия коэффициента теплового расширения кремния и сапфира. Высокая плотность дефектов влияет на процессы рассеяния носителей тока в КНС, особенно при низких температурах, и, следовательно, на величину и температурную зависимость подвижности носителей и удельного сопротивления КНС [16, 17]. Деформация сжатия кремния в плоскости пленки, достигающая величины $\varepsilon_{TO} \approx 3 \cdot 10^{-3}$ при комнатной температуре, приводит к сильному искажению энергетического спектра разрешенных зон кремния [18, 19]. Зависящее от температуры изменение зонной структуры оказывает влияние как на процессы рассеяния носителей тока, так и на тензорезистивный эффект в структурах КНС.

Влияние термической деформации сжатия на тензоэффект в КНС n- типа проводимости рассматривалось в работе [20]. Показано, что в отличие от объемного кремния в структурах n- КНС компоненты m_{12} и m_{13} тензора эластосопротивления не совпадают. Экспериментально определенные соотношения между коэффициентами эластосопротивления в n- КНС оказались равными $m_{11} = -m_{12}$; $m_{44} \approx m_{13} = 0$ [18], тогда как в объемном кремнии n- типа проводимости $m_{11} \approx -2m_{12} = -2m_{13}$.

Экспериментальные температурные зависимости коэффициентов тензочувствительности тензорезисторов, изготовленных из сильнолегированных структур КНС p- типа проводимости, приведены в работе [21]. На рис. 1 показано, что коэффициент эластосопротивления m_{44} в структурах p- КНС при комнатной температуре практически совпадает с усредненными значениями m_{44} для объемного кремния (кривая на рис. 1). Так же, как и в объемном кремнии, выполняется соотношение $m_{11}, m_{12} \ll m_{44}$.

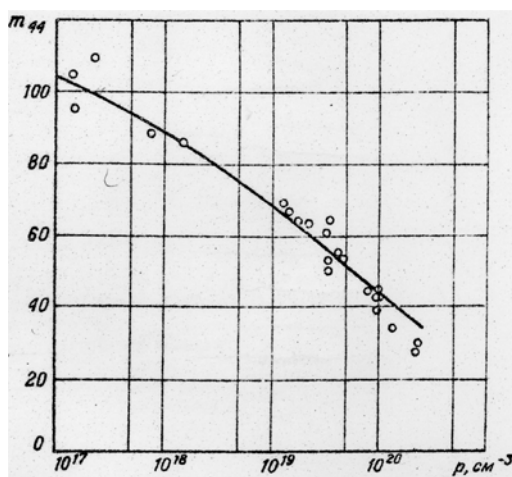


Рис. 1. Зависимость коэффициента эластосопротивления в структурах p- КНС от концентрации дырок.

Важной особенностью ПЧЭ на основе структур КНС является также зависимость электрофизических характеристик пленки кремния и чувствительности тензорезисторов к величине деформации сапфировой подложки от геометрических размеров последних. При формировании тензорезисторов в виде мезоструктуры по линии контакта кремний – сапфир – воздух возникают большие сдвиговые напряжения в кремнии, поскольку на свободной боковой грани тензорезистора термические напряжения отсутствуют [22]. Термическая деформация сжатия ε_T в пленке кремния изменяется от нуля на краю ее до максимального

значения ε_{T0} на достаточном удалении от края. Вследствие тензорезистивного эффекта под действием деформации ε_T изменяется удельное сопротивление пленки кремния в прикраевой области по сравнению с однородной пленкой КНС. Этот эффект особенно заметен поперек оси тензорезистора, когда область с измененным удельным сопротивлением составляет довольно большую долю объема тензорезистора. В результате, при уменьшении его ширины меняются среднее удельное сопротивление пленки кремния и его температурная зависимость.

Если ξ – степень ослабления средней термической деформации ε_T в пленке кремния поперек резистора, ориентированного под углом φ к направлению $[100]$ кремния и лежащего в плоскости (001) ($\xi = \varepsilon_T / \varepsilon_{T0}$), то относительное изменение среднего удельного сопротивления кремния в узком резисторе составляет

$$\frac{\Delta\rho}{\rho_0} = \left(m_{11} - \nu_k m_{12} - \frac{m}{2} \sin^2 2\varphi \right) (\varepsilon_1 + \varepsilon_2 \cos^2 \varphi) + \xi \left[\left(m_{12} - \nu_k m_{13} + \frac{m}{2} \sin^2 2\varphi \right) (\varepsilon_1 + \varepsilon_2 \sin^2 \varphi) - \frac{m}{4} \varepsilon_2 \sin 2\varphi \sin 4\varphi \right] \quad (1)$$

где ρ – удельное сопротивление ненапряженной пленки кремния; $\nu_k = c_{12}/c_{11} = 0,386$ – коэффициент Пуассона кремния; $m = m_{11} - m_{12} - 2m_{44}$; ε_1 – относительная термическая деформация однородной пленки кремния в направлении, перпендикулярном проекции оси c на поверхность $(T012)$ сапфировой подложки; $\varepsilon_1 + \varepsilon_2$ – то же в направлении, параллельном проекции оси c .

Как следует из выражения (1), в узких резисторах ($\xi < 1$) возникает анизотропия удельного сопротивления тем большая, чем меньше отношение ширины резистора b к его толщине d (рис. 2). Коэффициент ξ связан с величиной b/d экспериментальным соотношением

$$\xi \cong 1 - \exp(-0,1b/d) \quad (2)$$

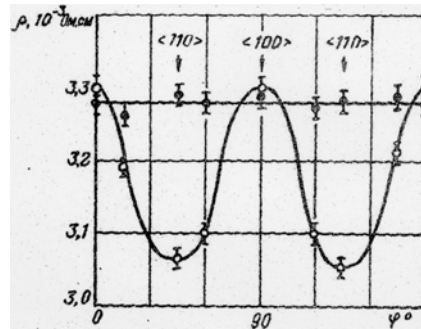


Рис. 2. Ориентационная зависимость удельного сопротивления кремния в резисторах различной ширины из p -КНС (концентрация дырок $p = 4,8 \cdot 10^{19} \text{ см}^{-3}$): $\circ$ - $b/d=9$; $\bullet$ - $b/d=190$.

На рис. 3 представлена зависимость отношения среднего удельного сопротивления пленки кремния вдоль узкого резистора к удельному сопротивлению ρ_∞ сплошной пленки кремния от величины b/d для двух направлений в пленке КНС – $[100]$ ($\varphi=0$) и $[110]$ ($\varphi=\pi/4$), – обладающих соответственно наименьшей и наибольшей тензочувствительностью. Кривые построены по соотношениям (1) и (2), точки показывают экспериментальные значения. Явление зависимости электрофизических свойств полупроводниковой пленки от ширины резистора имеет место в любых гетероэпитаксиальных структурах с неодинаковыми коэффициентами теплового расширения полупроводникового материала и подложки.

Несколько другой природы зависимость чувствительности тензорезисторов к деформации подложки от их геометрических размеров. Поскольку тензорезисторы имеют вид мезаструктуры, соединенной с подложкой только нижней гранью, деформация подложки ε поперек оси тензорезистора передается в его объем лишь частично. Если χ степень передачи деформации подложки ε в объем тензорезистора поперек его длинной оси $\chi = (\bar{\varepsilon} / \varepsilon)_\perp$, где $\bar{\varepsilon}$ – среднее значение деформации в тензорезисторе, то коэффициенты чувствительности продольного и поперечного (относительно деформации ε) тензорезисторов, ориентированных вдоль наиболее тензочувствительного направления $[110]$, имеют вид

$$K_{\parallel} = \frac{1}{\varepsilon} \left(\frac{\Delta R}{R_0} \right)_{\parallel} = \frac{1 - \chi \nu_c}{2} [m_{11} + (1 - 2\nu_k)m_{12}] + (1 + \chi \nu_c)m_{44} \quad (3)$$

$$K_{\perp} = \frac{1}{\varepsilon} \left(\frac{\Delta R}{R_0} \right)_{\perp} = \frac{\chi - \nu_c}{2} [m_{11} + (1 - 2\nu_k)m_{12}] - (\chi + \nu_c)m_{44}$$

где $\nu_c = 0,277$ – коэффициент Пуассона сапфира. Коэффициент χ связан с величиной b/d экспериментальным соотношением

$$\chi \cong 1 - \exp(-0,07b/d) \quad (4)$$

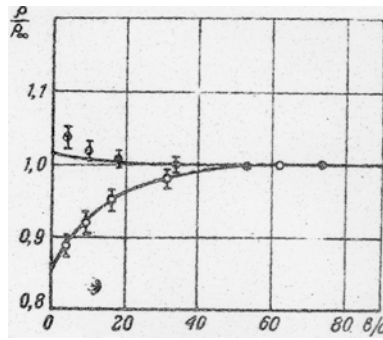


Рис. 3. Зависимость относительного изменения удельного сопротивления кремния в резисторах из КНС, ориентированных вдоль направлений [110] (o) и [100] (•), от отношения b/d при концентрации дырок $p \approx 5 \cdot 10^{19} \text{ см}^{-3}$

На рис. 4 (кривые построены по зависимостям (3) и (4), точки соответствуют экспериментальным значениям) показано, что с уменьшением ширины тензорезисторов их поперечная тензочувствительность заметно ослабляется. Это явление имеет место для любых (в том числе и автоэпитаксиальных) тензорезисторов, изготовленных в виде мезоструктуры.

Одна из существенных характеристик тензоэффекта в полупроводниках – его нелинейность. Как известно [1], зависимость относительного изменения сопротивления кремниевых тензорезисторов от деформации описывается нелинейным выражением вида

$$\frac{\Delta R}{R_0}(\varepsilon) = K\varepsilon + K^{(1)}\varepsilon^2 + K^{(2)}\varepsilon^3 + \dots$$

Для продольных и поперечных диффузионных кремниевых тензорезисторов p- типа, ориентированных вдоль направлений $\langle 110 \rangle$ в плоскости (001),

характер зависимостей $\frac{\Delta R}{R_0}(\varepsilon)$ существенно различается [23]:

$$\begin{aligned} \left(\frac{\Delta R}{R_0} \right)_{\parallel} &\cong K_{\parallel}\varepsilon + K_{\parallel}^{(2)}\varepsilon^2; \\ \left(\frac{\Delta R}{R_0} \right)_{\perp} &\cong K_{\perp}\varepsilon + K_{\perp}^{(1)}\varepsilon^2; \end{aligned} \quad (5)$$

поэтому тензочувствительные схемы. ПЧЭ, образованные комбинацией продольных и поперечных тензорезисторов, обладают значительной нелинейностью преобразования [23]. Для тензорезисторов из p-КНС (как продольных, так и поперечных), ориентированных вдоль направления $\langle 110 \rangle$, относительное изменение сопротивления хорошо описывается квадратичным двучленом типа (5), причем значения нелинейных коэффициентов $K^{(1)}$ также зависят от геометрических размеров тензорезисторов. Это дает возможность конструировать тензорезисторные ПЧЭ с высокой линейностью преобразования, а в некоторых случаях компенсировать нелинейность упругого преобразования в ТП.

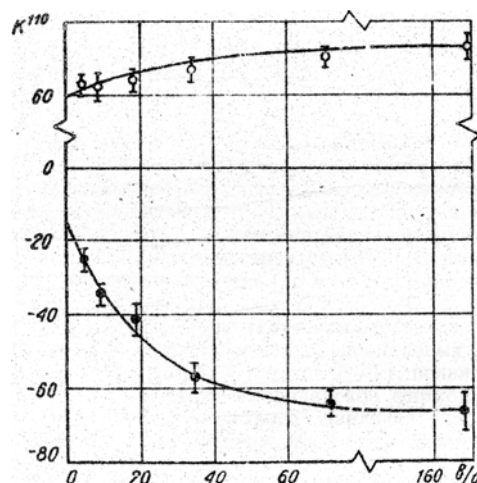


Рис. 4. Зависимость коэффициентов чувствительности продольных (o) и поперечных (•) тензорезисторов, ориентированных вдоль направления $\langle 110 \rangle$, от отношения b/d при концентрации дырок $p = 5 \cdot 10^{19} \text{ см}^{-3}$

ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНО-ТЕМПЕРАТУРНАЯ ИНВАРИАНТНОСТЬ ПЬЕЗОСОПРОТИВЛЕНИЯ В СТРУКТУРАХ p- КНС И ТЕМПЕРАТУРНАЯ АВТОКОМПЕНСАЦИЯ ПЧЭ И ТП

Рассмотрим требования, предъявляемые к материалам и конструкции «идеально термостабильного»

тензопреобразователя, выходной сигнал которого не зависит от температуры. Для определенности возьмем тензопреобразователь, имеющий ПЧЭ с наиболее широко распространенной тензочувствительной схемой в виде активного моста с четырьмя тензорезисторами $R_1 - R_4$, два из которых (R_1 и R_3) увеличивают свое сопротивление под влиянием деформации ПЧЭ, вызванной воздействием измеряемого механического параметра Π (давления, силы, перемещения и т. п.), а два других (R_2 и R_4) – уменьшают. Будем считать, что начальные сопротивления тензорезисторов при отсутствии деформации ПЧЭ одинаковы, т. е. мост сбалансирован при начальной температуре T_0 и $R_1 = R_3$, а $R_2 = R_4$.

Сопротивления R_j тензорезисторов зависят как от деформации ε (ε – характерная деформация поверхности сапфира ПЧЭ в месте расположения тензорезистора, например продольная деформация в ПЧЭ балочного типа или радиальная с ПЧЭ мембранного типа), так и от температуры T : $R_j = R_j(\varepsilon, T)$, $j=1, 2$. Деформация ε пропорциональна измеряемому механическому параметру Π

$$\varepsilon = A(T)\Pi, \quad (6)$$

где коэффициент упругого преобразования $A(T)$ определяется конструкцией тензопреобразователя и упругими характеристиками применяемых в нем материалов.

Температурная погрешность выходного сигнала тензопреобразователя складывается из двух составляющих – аддитивной и мультипликативной – принципиально различного происхождения. Аддитивная составляющая (температурный дрейф нуля, т. е. изменение выходного сигнала ТП в зависимости от температуры при $\Pi=0$) обусловлена различной температурной зависимостью сопротивлений тензорезисторов в смежных плечах моста, которая характеризуется температурным коэффициентом сопротивления (ТКС)

$$\alpha_{R_j} = \frac{1}{R(0, T)} \frac{\partial R(0, T)}{\partial T}. \quad (7)$$

Реализация ТКС тензорезисторов из КНС определяются, в основном, технологическим разбросом электрофизических характеристик пленки кремния и геометрических размеров тензорезисторов. Современная технология обеспечивает равенство ТКС тензорезисторов на одном ПЧЭ с погрешностью не хуже 0,2%, что вызывает температурный дрейф нуля ПЧЭ не более 0,02—0,05 % / 10° С.

Мультипликативная составляющая температурной погрешности, т. е. температурное изменение диапазона выходного сигнала (чувствительности) тензопреобразователя, определяется температурной зависимостью электрофизических характеристик материала ПЧЭ и упругих свойств ТП. Запишем сопротивление тензорезистора в мостовой тензочувствительной схеме в виде

$$R_j(\varepsilon, T) = R(T)[1 + K_j(\varepsilon, T)\varepsilon], j=1, 2 \quad (8)$$

где $K_j(\varepsilon, T)$ – коэффициент чувствительности тензорезистора. Тогда выходной сигнал ПЧЭ равен [2]

$$U_u(\varepsilon, T) = U^0 \varepsilon \frac{K_1(\varepsilon, T) - K_2(\varepsilon, T)}{2 + K_1(\varepsilon, T)\varepsilon + K_2(\varepsilon, T)\varepsilon} \cong U^0 K(\varepsilon, T)\varepsilon \quad (9)$$

при питании мостовой схемы от источника напряжения U^0 и

$$U_i(\varepsilon, T) = \frac{i^0}{2} R(T) [K_1(\varepsilon, T) - K_2(\varepsilon, T)] \varepsilon = i^0 R(T) K(\varepsilon, T)\varepsilon \quad (10)$$

при питании схемы от источника тока i^0 . В выражениях (9) и (10) $K(\varepsilon, T) = \frac{1}{2} [K_1(\varepsilon, T) - K_2(\varepsilon, T)]$ –

коэффициент тензочувствительности ПЧЭ. В выражении (9) учтено, что при ориентации тензорезисторов в плоскости (001) по направлениям $\langle 110 \rangle$ $K_1(\varepsilon, T) \cong -K_2(\varepsilon, T)$ в широком диапазоне температур.

Выходной сигнал ТП не зависит от температуры при условии, что

$$\frac{1}{U(\Pi, T)} \frac{\partial U(\Pi, T)}{\partial T} = 0. \quad (11)$$

Если ввести обозначения

$$\alpha_K = \frac{1}{K(\varepsilon, T)} \frac{\partial K(\varepsilon, T)}{\partial T}$$

- температурный коэффициент тензочувствительности ПЧЭ (ТЧК), а

$$\alpha_A = \frac{1}{A(T)} \frac{\partial A(T)}{\partial T}$$

(12)

- температурный коэффициент упругого преобразования тензопреобразователя (ТКУП), то условие независимости чувствительности ТП от температуры (11) можно записать в виде

$$\alpha_K + \alpha_A = 0$$

или

$$\alpha_K + \alpha_R + \alpha_A = 0$$

(13)

при питании мостовой тензочувствительной схемы ПЧЭ соответственно от генераторов напряжения или тока. А так как в абсолютном большинстве случаев $|\alpha_A| \ll |\alpha_R|$, $|\alpha_K|$ получаем, что температурные изменения чувствительности ТП определяются, главным образом, характеристиками полупроводникового материала тензорезисторов. Следовательно, чувствительность ТП не зависит от температуры, если во всем рабочем диапазоне температур выполняются условия

$$\alpha_K \cong 0$$

(14)

при питании мостовой схемы от источника напряжения и

$$\alpha_K + \alpha_R \cong 0$$

(15)

при питании схемы от источника тока.

Отметим, что в литературе для ТКС и ТКЧ используются чаще всего выражения, полученные из линеаризованных температурных зависимостей сопротивления и тензочувствительности. При этом, как видно из выражения (10), обращение в нуль суммы ТКС и ТКЧ не обеспечивает температурную стабильность чувствительности тензопреобразователя. Для уменьшения температурной зависимости чувствительности ТП с интегральными кремниевыми ПЧЭ используется питание мостовой тензосхемы от генератора тока [1, 24], но получить постоянную чувствительность в достаточно широком диапазоне температур в таких ТП не представляется возможным [24]. На рис. 5 показаны зависимости коэффициентов α_K и $\alpha_R + \alpha_K$ от поверхностной концентрации дырок p_s для мембранных интегральных ПЧЭ с диффузионными кремниевыми тензорезисторами, рассчитанные по данным фирмы Schlumberger (Франция) [25]. Как видно из рисунка, условия (14) и (15) не выполняются ни при каких значениях p_s в более или менее широком интервале температур. Поэтому обычно в интегральных кремниевых ПЧЭ используют тензорезисторы с $p_s \cong 3 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$ (что соответствует удельному сопротивлению около 0,02 Ом·см) и питают тензочувствительную схему от генератора тока, а получающуюся нелинейную температурную зависимость чувствительности ТП компенсируют с помощью различных электронных схем

В сильнолегированных структурах КНС р- типа проводимости для ПЧЭ с тензорезисторами, ориентированными по взаимно перпендикулярным направлениям типа [110], ТКЧ практически во всех случаях совпадает с температурным коэффициентом эластосопротивления (ТКЭ), являющимся характеристикой собственно структуры КНС:

$$\alpha_K = \frac{1}{K(T)} \frac{\partial K(T)}{\partial T} \cong \frac{1}{m_{44}(T)} \frac{\partial m_{44}(T)}{\partial T} = \alpha_m.$$

Как показали исследования, при определенном уровне легирования подобных структур КНС величины α_m и α_R остаются неизменными в широком интервале температур. Другими словами, в этом температурном интервале удельное сопротивление ρ и коэффициент эластосопротивления m_{44} структур р- КНС изменяются с температурой по закону

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

$$m_{44}(T) = m_0 \exp(\alpha_m T).$$

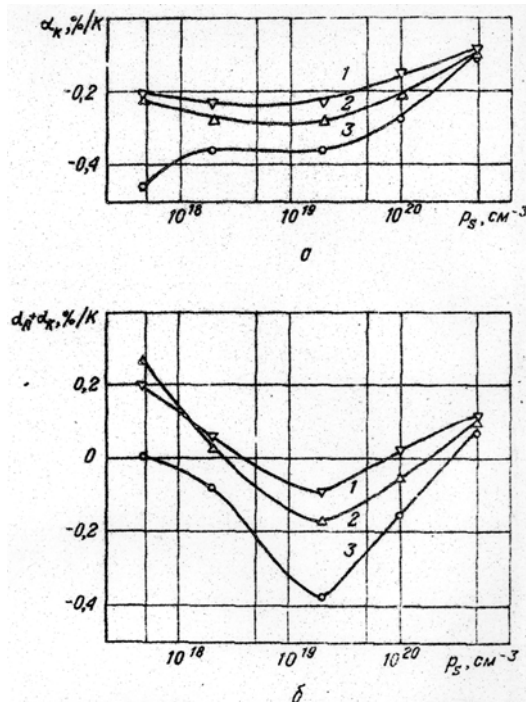


Рис. 5. Зависимость ТКЧ (а) и суммы ТКС и ТКЧ (б) от поверхностной концентрации дырок для кремниевых ПЧЭ мембранного типа с диффузионными тензорезисторами:

1 – при температуре 120° С; 2 – при 40° С; 3 – при -40° С

Сказанное хорошо иллюстрирует рис. 6, на котором приведены экспериментальные зависимости $\rho(T)$ и $m_{44}(T)$ в диапазоне температур 77—470 К, построенные в полулогарифмическом масштабе.

Поскольку величины $\alpha_p \approx \alpha_R$ и α_m представляют собой относительные скорости изменения удельного сопротивления и коэффициента эластосопротивления с температурой, явление одновременного постоянства этих величин в некотором интервале температур при определенном уровне легирования бором структур КНС может быть названо дифференциально-температурной инвариантностью пьезосопротивления (ДТИП). Зависимость температурных интервалов постоянства ТКС и ТКЭ от уровня легирования КНС- структур (рис. 7) показывает, что со стороны низких температур область ДТИП (выделена двойной штриховкой) ограничена приблизительно 180 К, а со стороны высоких температур уходит за 470 К. Явление ДТИП в структурах КНС наблюдается при концентрациях дырок не менее $2,5 \cdot 10^{19} \text{ см}^{-3}$, что соответствует удельному сопротивлению около 0,0055 Ом·см. Зависимость суммы величин $\alpha_p + \alpha_m$ в области их постоянства от уровня легирования структур КНС приведена на рис. 8. Как видно из рисунка, условие (15) выполняется при концентрации дырок $p_{20} = (8,0 \pm 0,8) \cdot 10^{19} \text{ см}^{-3}$, что соответствует удельному сопротивлению $(0,0021 \pm 0,0002) \text{ Ом} \cdot \text{см}$. Область выполнения условия температурной стабильности чувствительности ПЧЭ (15) показана на рис. 7 пунктиром. Таким образом, при питании мостовой схемы от генератора тока чувствительность ПЧЭ на основе КНС с концентрацией дырок, равной p_{20} , не зависит от температуры в диапазоне, по крайней мере, от 190 до 470 К (-80...+200° С).

На рис. 9 показаны зависимости коэффициентов α_K и $\alpha_R + \alpha_K$ от степени легирования кремния для ПЧЭ на основе КНС в диапазоне температур от 123 до 473 К (-150...+200°С). Эти зависимости принципиально отличаются от соответствующих зависимостей для диффузионных кремниевых ПЧЭ (см. рис. 5).

Во-первых, в области концентрации дырок $p_{10} = (2,0 \pm 0,2) \cdot 10^{20} \text{ см}^{-3}$ значение ТКЧ не превышает $\pm 0,02\%/K$ в диапазоне температур 77—273 К (-20С...0°С), т. е. в этом температурном диапазоне приблизительно выполняется условие (14). Следовательно, при питании мостовой тензосхемы от генератора напряжения температурная погрешность чувствительности ПЧЭ в указанном интервале температур может быть сделана не более $\pm 0,2\%/10 \text{ К}$, что позволяет во многих случаях не осуществлять дополнительной схемной компенсации чувствительности. Во-вторых, как уже обсуждалось, при концентрации дырок $p_{20} = (8,0 \pm 0,8) \cdot 10^{19} \text{ см}^{-3}$ в диапазоне температур 190—470 К выполняется условие (15). С учетом точного условия (13) это означает, что при питании мостовой тензосхемы ПЧЭ от генератора тока температурная погрешность чувствительности тензопреобразователя определяется лишь величиной α_A (12). А так как в этом интервале температур α_A представляет собой, как правило, медленно меняющуюся положительную величину, практически для любого типа ТП можно подобрать такой оптимальный уровень легирования p_2 при котором будет выполняться условие (13), правда, как следует из рис. 7, в несколько суженном со стороны низких значений диапазоне температур.

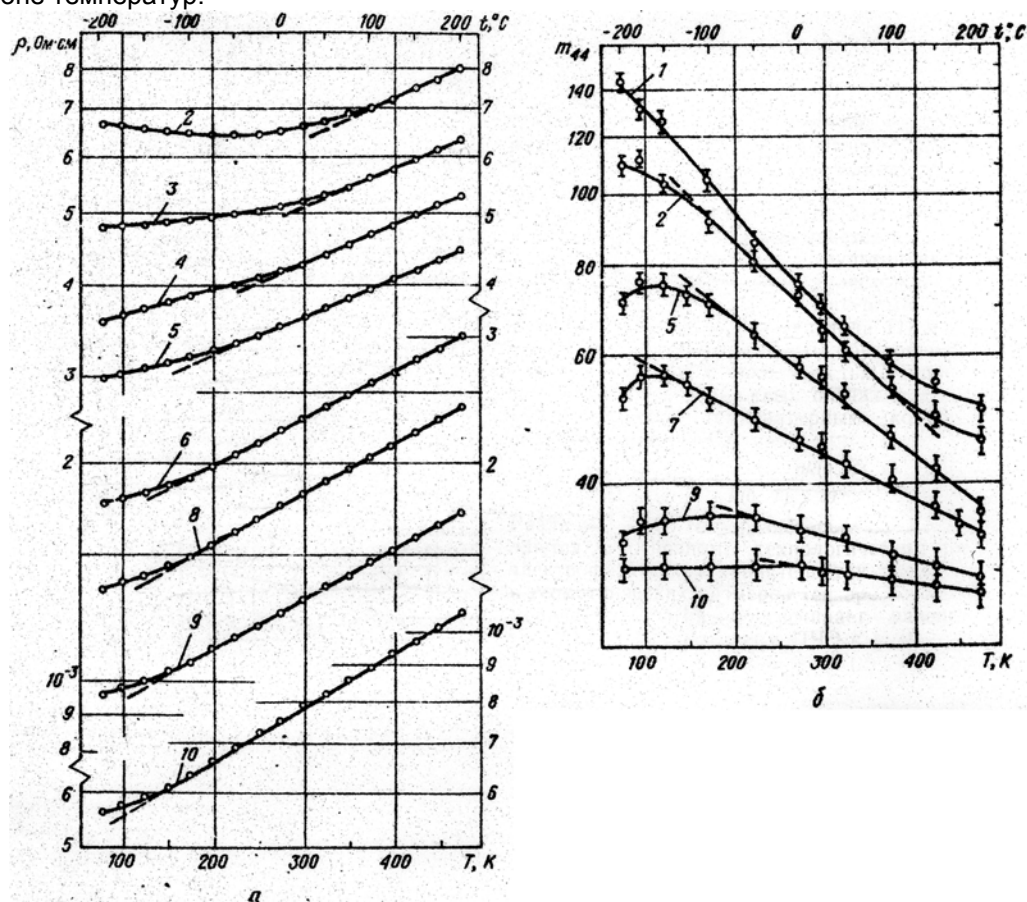


Рис. 6. Температурные зависимости удельного сопротивления (а) и коэффициента эластосопротивления (б) структур КНС р- типа:

1 – концентрация дырок $p = 1,3 \cdot 10^{19} \text{ см}^{-3}$; 2 – $p = 2,1 \cdot 10^{19} \text{ см}^{-3}$; 3 – $p = 2,8 \cdot 10^{19} \text{ см}^{-3}$; 4 – $p = 3,6 \cdot 10^{19} \text{ см}^{-3}$; 5 – $p = 4,3 \cdot 10^{19} \text{ см}^{-3}$; 6 – $p = 7,2 \cdot 10^{19} \text{ см}^{-3}$; 7 – $p = 7,9 \cdot 10^{19} \text{ см}^{-3}$; 8 – $p = 8,5 \cdot 10^{19} \text{ см}^{-3}$; 9 – $p = 1,3 \cdot 10^{20} \text{ см}^{-3}$;

$$10 - p = 2,3 \cdot 10^{20} \text{ см}^{-3};$$

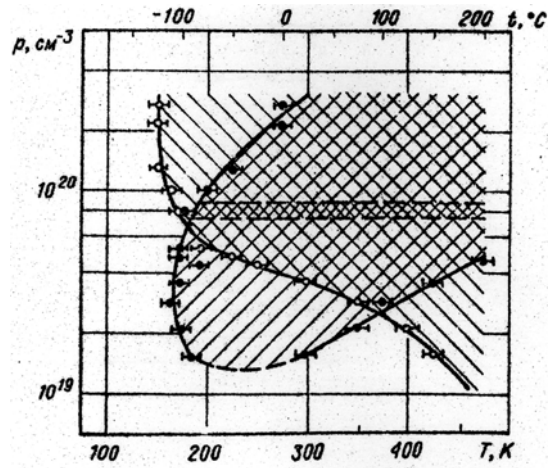


Рис. 7. Границы температурных интервалов постоянства ТКС (○) и ТКЭ (●) структур КНС p - типа проводимости при различных концентрациях дырок

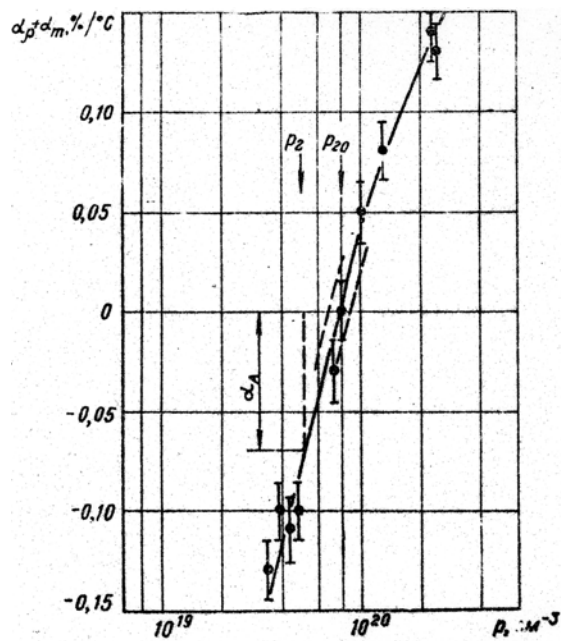


Рис. 8. Зависимость суммы ТКС к ТКЧ в области ДТИП от концентрации дырок в КНС

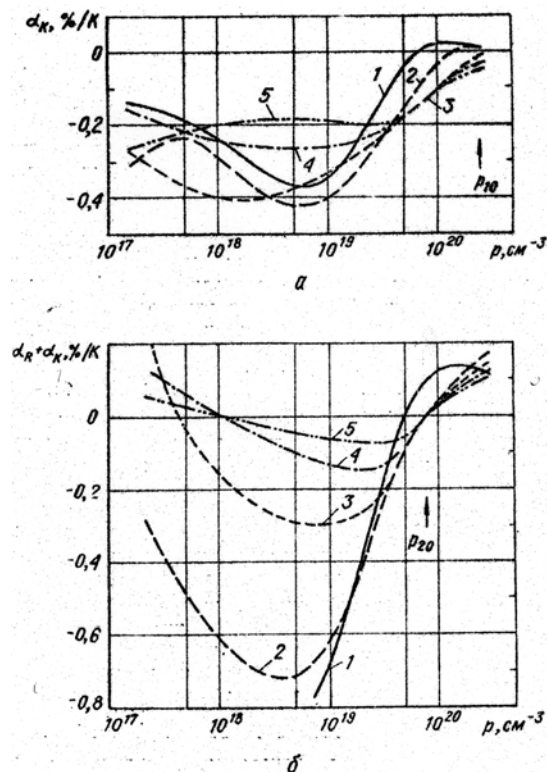


Рис. 9. Зависимость ТКЧ (а) и суммы ТКС и ТКЧ (б) от концентрации дырок для ПЧЭ на основе КНС: 1 – при температуре – 150° С; 2 – при – 100° С; 3 – при 0° С; 4 – при 100° С; 5 – при 200° С.

Соответствующим выбором степени легирования структур КНС можно получать ПЧЭ с выходным сигналом, не зависящим от температуры. При этом происходит как бы автокомпенсация температурной погрешности преобразования, поскольку при питании тензосхемы от генератора тока уменьшение выходного сигнала в результате падения тензочувствительности ПЧЭ точно компенсируется увеличением напряжения питания благодаря росту сопротивления тензорезисторов. Подобная автокомпенсация ПЧЭ на основе КНС может быть использована для создания высокоточных тензопреобразователей механических величин, работающих в широком диапазоне температур (по крайней мере, от -200 до +200° С) и не требующих дополнительной схемной компенсации температурной погрешности. Как показали исследования, явление автокомпенсации может иметь место в КНС вплоть до температур порядка 500° С [12].

ОСОБЕННОСТИ ПРОЕКТИРОВАНИЯ И ИЗГОТОВЛЕНИЯ ПЧЭ И ТЕНЗОПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ

В число задач, решаемых при проектировании ПЧЭ на основе структур КНС, входит выбор оптимальных размеров и расположения тензорезисторов на ПЧЭ, а также выбор оптимального уровня легирования структур КНС, обеспечивающего минимальную температурную погрешность преобразования. Эти задачи должны решаться с учетом конструкции ТП и формы используемого ПЧЭ. В качестве примера рассмотрим два основных вида конструкции тензопреобразователей давления и силы (ускорения), использующих ПЧЭ на основе структур КНС (рис. 10). В тензопреобразователях давления и силы, показанных на рис. 10, а и б соответственно, ПЧЭ мембранного или балочного типа выполняют одновременно функции упругого элемента ТП, преобразующего измеряемый параметр (давление P или силу F) в деформацию тензорезисторов. В тензопреобразователях на рис. 10, в и г ПЧЭ жестко соединены с металлическими упругими элементами ТП, и функция упругого преобразования (б) определяется свойствами образующейся многослойной структуры.

Оба вида конструкций имеют свои достоинства и недостатки. В тензопреобразователе с сапфировым упругим элементом [15, 26] отсутствуют гистерезисные и усталостные явления, присущие металлу, и тепловая деформация ПЧЭ, возникающая из-за соединения с металлическими деталями тензопреобразователя и ведущая к дополнительной температурной погрешности; значение ТКУП определяется только упругими характеристиками КНС, поэтому оптимальный уровень легирования не зависит от конструкции тензопреобразователя и обеспечивает автокомпенсацию температурной погрешности в максимальном диапазоне температур. Вместе с тем, из-за хрупкости сапфира подобные тензопреобразователи обладают пониженной надежностью в условиях возможных ударных перегрузок; для предотвращения разрушения ПЧЭ должны работать при малых деформациях, что снижает чувствительность ТП [15]. Обеспечение широкого диапазона измерения требует набора ПЧЭ разнообразных размеров и конфигураций, что нежелательно при массовом производстве. Само изготовление таких ПЧЭ представляет сложную задачу, ибо современная технология обработки монокристаллов сапфира не позволяет получать в массовом производстве сапфировые детали точно заданных размеров и сложной формы; наращивание однородной кремниевой пленки на профилированную сапфировую подложку также является довольно

сложным технологическим процессом.

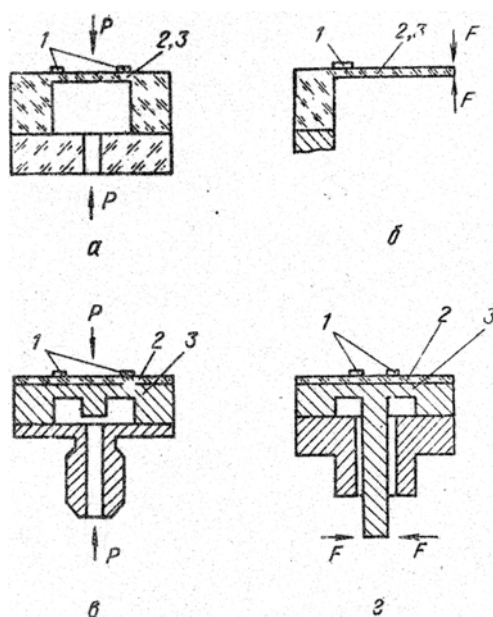


Рис. 10. Тензопреобразователи давления (а, в) и силы (б, г) с ПЧЭ на основе КНС: 1 – тензорезисторы; 2 – ПЧЭ; 3 – упругий элемент

Тензопреобразователи с металлическими упругими элементами обладают высокой надежностью в самых тяжелых условиях эксплуатации; даже при разрушении ПЧЭ Тензопреобразователи сохраняют герметичность. Металлическим упругим элементам можно легко придавать любые размеры и форму, обеспечивая высокую линейность упругого преобразования, а используемые ПЧЭ могут быть унифицированными и иметь простейшую конфигурацию, удобную для массового производства на стандартном оборудовании. Разработанная технология жесткой пайки ПЧЭ на металлические упругие элементы [27] обеспечивает полную передачу деформации от упругого элемента к ПЧЭ. Однако большая разница в коэффициентах теплового расширения металла упругого элемента и сапфира ведет к возникновению в ПЧЭ термических деформаций, изменяющих значения ТКС и ТКЧ тензорезисторов и приводящих к дополнительной аддитивной температурной погрешности из-за неоднородности переходного слоя. Кроме того, поскольку функция упругого преобразования (б) в таких ТП зависит, от характеристик как сапфира, так и металла, на оптимальный уровень легирования структур КНС в общем случае влияет конструкция ТП, а автокомпенсация температурной погрешности чувствительности обеспечивается в менее широком диапазоне температур. Наконец, пайка сапфира жесткими припоями требует наличия титана и проходит при высоких температурах (около 850° С). Несмотря на то, что дисперсионно-твердеющие титановые сплавы (ВТ-9, ВТ-15 и др.) имеют хорошие упругие характеристики в довольно широком диапазоне температур, необходимость пайки ПЧЭ ограничивает выбор материала упругого элемента и предельную рабочую температуру ТП и несколько усложняет технологию изготовления последних.

Оптимальное расположение тензорезисторов на ПЧЭ выбирается из условия обеспечения максимального выходного сигнала и минимальной нелинейности преобразования. В мембранных тензопреобразователях давление (см. рис. 10, а, в) тензорезисторы располагаются у внешнего края мембраны параллельно и перпендикулярно радиусу вдоль кристаллографических направлений $\langle 110 \rangle$ [28], в балочном тензопреобразователе силы (см. рис. 10, б) – возможно ближе к месту заделки балки и ориентируются вдоль и поперек ее оси по направлениям $\langle 110 \rangle$. В мембранно-рычажном ТП силы (см. рис. 10, г) тензорезисторы расположены у края жесткого центра мембраны вдоль радиуса по одному из направлений $\langle 110 \rangle$. Ширина и толщина тензорезисторов из КНС в отличие от диффузионных выбираются из условия обеспечения минимума нелинейности выходного сигнала ТП. Как правило, активные тензорезисторы сочиняются в замкнутую мостовую схему [29]. В смежные плечи моста включаются дополнительные кремниевые резисторы, закороченные кремниевыми металлизированными перемычками и служащие для начальной балансировки мостовой схемы. Как активные, так и подгоночные резисторы, а также все соединительные дорожки и перемычки нормируются одновременно анизотропным травлением пленки кремния в растворе едкого калия. Изготовление замкнутой мостовой тензосхемы позволяет исключить влияние переходных контактных сопротивлений на метрологические характеристики ТП и повысить их временную стабильность. Для дополнительной стабилизации характеристик все резисторы защищаются пленкой термического или пиролитического окисла. Следует иметь в виду, что при термическом окислении структур КНС концентрация бора в пленке кремния понижается [30], так что в исходных структурах уровень легирования должен быть выше оптимального.

Все процессы формирования тензочувствительной схемы ПЧЭ (окисление, фотолитография, травление окисла и кремния) проводятся по групповой технологии полупроводниковых интегральных схем на стандартном технологическом оборудовании. При этом в зависимости от размеров ПЧЭ и структур КНС на

одной структуре одновременно формируются тензосхемы от одного до нескольких десятков ПЧЭ. После разделения (обычно скрайбированием) ПЧЭ напаиваются твердым припоем всей поверхностью на упругий элемент тензопреобразователя. На контактные площадки и соединительные дорожки напыляется алюминий, а вход и выход тензосхемы соединяются с контактами коллектора термокомпрессией золотых или алюминиевых проводников. Если тензопреобразователи предназначены для работы при отрицательных температурах или конструкция датчика не предусматривает защиту тензосхемы от контакта с атмосферой и измеряемой средой, после балансировки моста вся поверхность ПЧЭ дополнительно покрывается тонким слоем герметика для защиты от влаги. В тензопреобразователях давления с профилированным ПЧЭ (см. рис. 10, а) сложная форма сапфирового упругого элемента достигается либо газовым травлением сапфира при высокой температуре перед наращиванием пленки кремния [26], либо соединением плоской сапфировой мембраны с керамическим основанием стеклоприпоем [15].

МЕТРОЛОГИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ТЕНЗОПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ С ПЧЭ НА ОСНОВЕ КНС

К настоящему времени на основе структур КНС разработан ряд тензопреобразователей и датчиков механических величин с высокими метрологическими характеристиками.

Первые датчики избыточного давления «Кристалл» [9] класса точности 1-1,5 охватывали диапазон давлений от 0-0.1 до 0-40 МПа, строились на базе ТП мембранного типа с плоской металлической мембраной и имели нелинейность 0,3-0,5%, а гистерезис не более 0,1%. Поскольку первоначально в датчиках «Кристалл» использовались структуры КНС с $\rho \approx 4,5 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$, не обеспечивающие автокомпенсации температурной погрешности чувствительности, область рабочих температур датчиков составляла 5-50° С, а трудоемкость температурной компенсации с помощью электронных схем была довольно высока. Следует, однако, отметить, что исследования датчиков «Кристалл» показали высокую временную стабильность характеристик тензопреобразователей на основе КНС: изменение параметров не превышало $\pm 0,1\%$ за 18000 ч работы [31].

Комплекс датчиков «Сапфир» класса точности 0,6-1,5 [10], предназначенных для измерения абсолютного и избыточного давлений, разрежения, разности давлений и т. п. (всего восемь параметров), построен на основе тензопреобразователей силы и давления с металлическим упругим элементом на ПЧЭ диаметром 20 мм. Датчики обеспечивают измерения в широком диапазоне значений параметров во взрывоопасных условиях эксплуатации с основной погрешностью 0,3-0,5%. Частичная оптимизация ПЧЭ, использованных в тензопреобразователях датчиков «Сапфир», и дополнительная схема температурной компенсации позволили добиться изменения выходного сигнала в пределах 0,2—0,3%/10° С в интервале температур $\pm 50^\circ \text{ С}$.

Более совершенным в конструктивном и метрологическом отношении являются тензопреобразователи силы и давления с металлическими упругими элементами и ПЧЭ размером 10x10 мм [29]. Основные характеристики этих ТП приведены в таблице (первые два прибора), а типичные температурные зависимости относительного изменения начального сигнала и чувствительности показаны на рис. 11. Для сравнения там же пунктирной линией дана температурная зависимость чувствительности интегрального кремниевого ТП давления фирмы Schlumberger [32]. Маленькая нелинейность, практическое отсутствие гистерезиса, высокий уровень выходного сигнала и небольшая температурная погрешность в широком диапазоне температур позволяют во многих случаях использовать ТП на основе структур КНС для непосредственных измерений силы и давления без дополнительных схем усиления сигнала и компенсации температурных погрешностей.

На основе этих тензопреобразователей силы и давления разработан комплекс общепромышленных высокоточных датчиков «Сапфир-22» класса точности 0,1-0,25 [33]. Датчики предназначены для преобразования в сигнал постоянного тока 0-5, 0-20 или 4-20 мА абсолютного и избыточного давлений, разрежения, разности давлений, расхода жидкостей и газов, уровня жидких сред и работают в диапазоне температур от -50 до +80° С. Перестраиваемый (до 10:1) диапазон измерений позволяет существенно сократить количество выпускаемых моделей датчиков. По диапазону измеряемых величин, метрологическим характеристикам, стабильности и надежности комплекс датчиков «Сапфир-22» является на сегодняшний день самой совершенной системой общепромышленных приборов для измерения теплоэнергетических параметров.

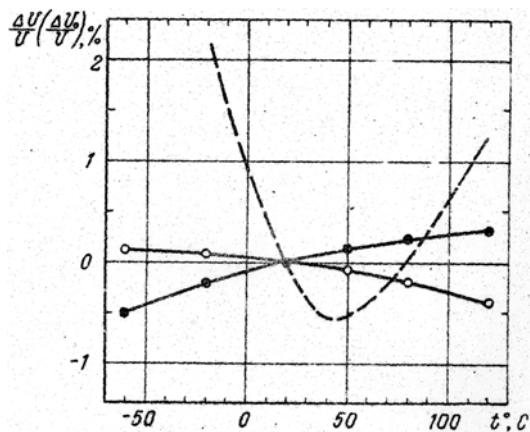


Рис. 11. Относительные значения аддитивной (•) и мультипликативной (о) температурных погрешностей тензопреобразователя с ПЧЭ на основе КНС

Для работы в области криогенных и повышенных температур предназначены третий и четвертый приборы из приведенных в таблице [11, 12]. Пятый – это миниатюрный ТП давления для исследования кишечно-желудочного тракта [26], шестой (и последний) – ТП абсолютного давления американской фирмы Congas Corp. Низкий выходной сигнал этого ТП компенсируется почти 20-кратным запасом по прочности; схема температурной компенсации обеспечивает маленькую погрешность, хотя и сужает температурную область использования тензопреобразователя. Заметим, что стоимость ТП давления фирмы Congas Corp. достаточно высока – от 1200 до 1900 долл. [15].

ОБЛАСТИ ПРИМЕНЕНИЯ И ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ ПЧЭ И ТП НА ОСНОВЕ СТРУКТУР КНС

Специфические особенности ПЧЭ на основе структур КНС и имеющийся опыт их использования говорят о широких возможностях тензопреобразователей с полупроводниковыми чувствительными элементами на КНС. В первую очередь, они находят применение для построения комплексов высокоточных, высокостабильных, надежных датчиков механических величин для систем контроля и управления разнообразными технологическими процессами во всех отраслях промышленности. Благодаря химической инертности сапфира микроминиатюрные ПЧЭ на основе профилированных структур КНС удобны для биомедицинских исследований, особенно в системах диагностики заболеваний [34]. Малогабаритные ТП с расширенным диапазоном температур могут быть использованы и системах технической диагностики, например в двигателестроении [15].

Перспективы использования структур «кремний на сапфире» в ПЧЭ и ТП определяются прежде всего их достоинствами. Возможность автокомпенсации температурной погрешности чувствительности в ПЧЭ на основе КНС позволяет выпускать датчики механических величин достаточно высокой точности (класса 0,5-1,5), работающие в широком диапазоне температур без индивидуальной компенсации температурной погрешности, проведение, которой в датчиках с интегральными ПЧЭ, по данным фирмы Honeywell Inc. (США), составляет до 2/3 стоимости датчика [35]. Разработка более совершенной технологии соединения ПЧЭ с металлическими упругими элементами и деталями корпуса, а также введение корректирующих элементов в тензочувствительную схему позволят существенно снизить основную составляющую температурной погрешности ТП – температурный дрейф нуля – и повысить класс точности датчиков, не нуждающихся в индивидуальной схемной температурной компенсации, до 0,1—0,3.

Высокие механические характеристики и стабильность свойств структур КНС в полной мере должны проявиться в тензопреобразователях, упругие элементы которых выполнены из монокристаллического сапфира и жестко соединены с корпусными деталями из сапфира или глиноземной керамики. Точность преобразования у подобных ТП будет находиться на уровне образцовых средств измерения. Для создания таких тензопреобразователей необходима разработка технологии получения профилированных структур КНС разнообразной формы с точным соблюдением размеров и осуществления жесткого, температуростабильного соединения сапфировых деталей при относительно невысокой (400—900° С) температуре.

Отличные упругие и изолирующие свойства сапфира в области высоких температур и отсутствие *p-n*-переходов позволяют создавать ПЧЭ на основе КНС, работоспособные до температур порядка 700° С. Основные технические трудности при этом заключаются в разработке стабильных высокотемпературных контактов к кремнию и высокотемпературных электрических выводов для ТП и в обеспечении жесткого соединения ПЧЭ с температуростойкими деталями корпуса тензопреобразователя.

Высокая радиационная стойкость сапфира, использование сильнолегированного кремния и отсутствие *p-n*-переходов делают ПЧЭ на основе КНС перспективными для применения в условиях интенсивного облучения. Тензопреобразователи с такими ПЧЭ представляют большой интерес для атомной энергетики и других отраслей народного хозяйства. Хорошо зарекомендовали себя ПЧЭ на основе КНС и при измерении механических параметров в условиях криогенных температур. Здесь предстоят еще серьезные исследовательские и конструкторские работы, однако с учетом расширяющегося использования низких температур в современной технике эту область применения ПЧЭ на основе КНС также следует считать

перспективной.

Сегодня можно указать на два недостатка структур КНС, несколько ограничивающих возможности их использования в ТП механических величин: относительно высокая стоимость сапфировых подложек по сравнению с кремниевыми и сложность профилирования сапфира при массовом изготовлении ПЧЭ. Эти недостатки мешают ПЧЭ на основе КНС успешно конкурировать с интегральными кремниевыми ПЧЭ в таких областях потенциально массового потребления тензопреобразователей, как автомобильная промышленность или бытовая техника, где стоимость датчиков является определяющим фактором [4]. Вместе с тем следует помнить, что, во первых, указанные недостатки обусловлены достоинствами (как ни парадоксально это звучит) структур КНС: высокой прочностью, твердостью и химической стойкостью сапфира, а во-вторых, они связаны в основном с начальным этапом промышленного становления технологии производства КНС. За последнее десятилетие стоимость сапфировых подложек уменьшилась на порядок, а диаметр увеличился в 5 раз, причем тенденция к снижению стоимости подложек сохраняется. И, наконец, более простая технология изготовления и меньший процент брака при производстве ПЧЭ на основе КНС по сравнению с интегральными кремниевыми ПЧЭ, а также лучшие температурные характеристики тензопреобразователей уменьшают разницу в стоимости готовых ТП на основе КНС и с интегральными кремниевыми ПЧЭ по сравнению с разницей в стоимости исходных материалов.

Таким образом, использование в тензопреобразователях специфических свойств гетероэпитаксиальных структур «кремний на сапфире» позволило создать новое поколение датчиков механических величин на основе тензорезисторных ПЧЭ. Это поколение, построенное на едином принципе преобразования, сохраняет все достоинства датчиков с интегральными кремниевыми ПЧЭ в части высокой чувствительности, надежности, малых габаритов и возможности массового производства. В то же время оно дополнительно характеризуется повышенной точностью преобразования и может быть использовано в широкой области температур при жестких условиях эксплуатации.

Прибор, организация-разработчик, страна	Пределы измерения	Конструкция	Сопротивление моста, кОм	Ток (напряжение) питания	Начальный выходной сигнал, мВ	Диапазон выходного сигнала, мВ	Нелинейность, %	Гистерезис, %	Диапазон рабочих температур, °С	Температурный дрейф		Габаритные размеры, мм	Состояние разработки
										нуля, мВ/10°С	чувствительности, %/10°С		
ТП силы, НИИТеплоприбор, СССР	0-5; 0-50 Н	Мембранно-рычажный с металлическим упругим элементом (УЭ)	3,2±0,2	2 мА	5	300±30	±0,05	<0,02	-60...+120	±(0,05-1,5)	±(0,05-0,3)	Ø20x40	Серийное производство
ТП давления, НИИТеплоприбор, СССР	0-2,5; 0-16; 0-100 МПа	Мембранный с металлическим УЭ	3,2±0,2	2 мА	5	300±30	±(0,05-0,15)	<0,02	-60...+120	±(0,05-1,5)	±(0,05-0,3)	Ø20x30	То же
То же	0-0,1... 0-100 МПа	То же	3,2±0,2	2 мА	5	100±10	±(0,05-0,15)	<0,02	-273...+50	±(0,05-1,5)	0,5-1,0	Ø40x30... Ø20x30	Макетные образцы
»	0-0,1... 0-100 МПа	»	3,2±0,2	2 мА	5	100±10	±(0,05-0,15)	<0,02	-30...+400	±(0,05-1,5)	±(0,01-0,3)	Ø40x30... Ø20x30	То же
ТП давления, СССР	0-400 кПа	Мембранный с сапфировым УЭ	1,0	3В	100	15	1	-	20-42	1 мВ/10°С		Ø2x2	Серийное производство
ТП давления, фирма Congas Corp., США	Не более 0-7 МПа	То же	-	-	-	50±2	-	-	-54...+246	±0,3 и ±4% при 200°С (с элементами компенсации)		-	-

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Полупроводниковые тензодатчики /Под ред. М. Дина. М.—Л.: Энергия, 1985. 213 с.
2. Эрлер В., Вальтер Л. Электрические измерения неэлектрических величин полупроводниковыми тензорезисторами. М.: Мир, 1974. 285 с.
3. Borky J. M., Wise K. D. Integrated signal conditioning for silicon pressure sensors—IEEE Trans. Electron. Devices, 1979, vol. 26, N 12, p. 1906.
4. Allan R. New applications open up for silicon sensors: a special report. — Electronics, 1980, vol. 53, N 24, p. 113.
5. Папков В. С., Цыбульников М. В. Эпитаксиальные кремниевые слои на диэлектрических подложках и приборы на их основе. М.: Энергия, 1979. 88 с.
6. Brucker C. J., Thurlow L. Memory behaviour in a radiation environment. - Electr. Eng., 1979, vol. 51, N 617, p. 67.
7. Ксенофонтов М. Е. Упругие элементы тензопреобразователей из сапфира. - Приборы и системы управления, 1970, №3, с. 61.
8. Ксенофонтов М. Е., Суровиков М. В. Миниатюрный гетероэпитаксиальный преобразователь давления. - В кн.: Приборы точной механики и технология приборостроения. М., 1972, №2. с. 176.
9. Полупроводниковый датчик давления «Кристалл»/Кенигсберг В. Л., Сердюков В. И., Мильман С. И. и др. - Приборы и системы управления, 1974, № 7, с. 26.
10. Комплекс полупроводниковых тензорезисторных измерительных преобразователей «Сапфир»/Кенигсберг В. Л., Стучебников В. М., Сердюков В. И. и др. — Измерительная техника, 1978, №10, с. 84.
11. Лурье Г. И., Стучебников В. М., Хасиков В. В. Использование структур КНС в низкотемпературных датчиках давления. — Приборы и системы управления, 1981, №9, с. 20.
12. Стучебников В. М., Суханов В. И., Хасиков В. В. Тензорезисторные чувствительные элементы на основе структур «кремний на сапфире» в преобразователях давления для высоких температур. — Приборы и системы управления, 1981, № 3, с. 23.
13. Tivy V. V., Friedline L. E., Bergman C. E. Technology trends in industrial pressure sensors.—Autom. Control, 1978. vol. 8, N 5, p. 25.
14. Пат. 4127840 (США). Solid state force transducer/ J. H. House. Оpubл. 28.11.1978.
15. Allan R. Transducers make use of SOS diaphragms. — Electronics, 1979, vol.-52, N 24, p. 42.
16. Стучебников В. М. Электрофизические характеристики гетероэпитаксиальных пленок кремния на сапфире и шпинели. — Обзоры по электронной технике. Сер. Материалы. М.: ЦНИИ «Электроника», 1980, № 2 (705).. 38 с.
17. Температурная зависимость подвижности носителей в сильнолегированных слоях кремния p- типа на сапфире/Белоглазов А. В., Бейден В. Е., Папков В. С., Стучебников В. М. — Электронная техника. Сер. Материалы. М.: ЦНИИ «Электроника», 1976, № 10, с. 44.
18. Hynesek J. Elastoresistance in n- type silicon on sapphire.-J. Appl. Phys., 1974, vol. 45, N 6, p. 2631.
19. Ohmura Y. Calvanomagnetic effect for holes and the valence band in (001) silicon on sapphire. - J. Phys Soc Japan, 1979, vol. 47, N 1, p. 145.
20. Гридчин В. А. Пьезосопротивление в структурах КНС n- типа. — В кн.: Электронное и полупроводниковое приборостроение. Новосибирск, 1977, с. 136.
21. Тензорезистивный эффект в сильнолегированных слоях кремния p- типа на сапфире/ Белоглазов А. В., Бейден В. Е., Карнеев В. М. и др. — Электронная техника. Сер. Материалы. М.: ЦНИИ «Электроника», 1977, № 5, с. 45.
22. Shear strain at corners and edges of epitaxial silicon on sapphire/Abrahams M. S. Blanc J., Buiocchi C. J., Ham W. E.-J. Appl. Phys., 1978, vol. 49, N 2, p. 652.
23. Wilner L. B. A diffused silicon pressure transducer with stress concentrated at transverse gages.—ISA Trans. 1978, vol. 17, N 1. p. 83.
24. Гридчин В. А. Оптимизация параметров интегральных тензопреобразователей. - В кн.: Измерительные преобразователи механических и тепловых величин на базе микроэлектроники. М., 1980, с. 31.
25. Capteurs de pressions piezoresistants: Препринт фирмы Schlumberger (Франция), 1976. 24р.
26. Микроминиатюрный биомедицинский тензопреобразователь/ Алекса А. Г., Зимин В. Н. Корнеев В. Н. и др. — Электронная техника. Сер. 11. М.: ЦНИИ «Электроника», 1978, №2 (6), с. 43.
27. Пайка сапфировых мембран с высокопрочными сплавами титана/Никифорова З. В., Румянцев С. Г., Киселевский С. Л., Евдокимов В. И. — Сварочное производство. 1974, №3, с. 35.
28. Пивоненков Б. И. Стучебников В. М. Проектирование полупроводниковых интегральных тензочувствительных структур. — Приборы и системы управления, 1976, № 1, с. 20.
29. Полупроводниковые тензопреобразователи давления и силы на основе гетероэпитаксиальных структур «кремний на сапфире»/Белоглазов А. В., Стучебников В. М., Хасиков В. В. и др. - Приборы и системы управления. 1982, № 5, с. 21—27.
30. Distribution of dopant in SiO₂—Si/Av-Ron M., Shatzkes M.: Burkhardt P. J., Cadoff I. - J. Appl. Phys., 1976, vol. 47, N 7, p. 3159.
31. Полупроводниковые тензорезисторные измерительные преобразователи теплоэнергетических параметров, принципы построения и характеристики/Иордан Г. Г., Кенигсберг В. Л., Сердюков В. И. и др.-В

кн.: Приборостроение и автоматический контроль. М., 1978, № 1, с.184.

32. Fiche Technique 76008: Проспект фирмы Schlumberger (Франция), 1976, 4 р.

33. Иордан Г. Г. Полупроводниковые тензорезисторные преобразователи общепромышленного назначения. – В кн.: Измерительные преобразователи механических и тепловых величин на базе микроэлектроники. М., 1980. с. 3.

34. Миниатюрный первичный преобразователь давления для исследования верхнего отдела желудочно-кишечного тракта/ Алекса А. Г., Горошко В. Н., Зимин В. Н. и др. -Электронная промышленность, 1979, № 8—9. с. 41.

35 Bicking R. P-to-V transducer available in control market after automotive baptism. – Contr. Eng., 1978, vol. 25. N 11, p. 51.