

Д. т. н. Р. И. БАЙЦАР, д. т. н. С. С. ВАРШАВА,
к. ф.-м. н. В. Ф. ЧЕКУРИН

Дата поступления в редакцию
08.09 1997 г. — 10.02 1998 г.
Оппонент к. ф.-м. н. В. П. ОВСЯНИКОВ

Украина, г. Львов, Гос. ун-т «Львівська політехніка»

МИНИАТЮРНЫЕ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫЕ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ ИМПУЛЬСНЫХ ДАВЛЕНИЙ

Предложены способы повышения эффективности использования датчиков давления с чувствительными элементами из нитевидных кристаллов GaAs и Te.

The efficiency increase techniques of use of pressure transducers with sensing elements from GaAs and Te whiskers have been proposed.

Известны датчики гидростатического давления, функционирование которых основано на объемном тензорезистивном эффекте полупроводников Te, $Al_xGa_{1-x}As$, $GaAs_{1-x}P_x$, GaSb и других [1–5]. Чувствительные элементы (ЧЭ) таких датчиков изготавливаются из монокристаллов, тонких пленок или нитевидных кристаллов (НК). ЧЭ датчиков на основе НК обычно имеют диаметр несколько десятков микрон, а длину — до нескольких миллиметров. Однако, ввиду довольно низкой чувствительности к всестороннему сжатию, датчики такого типа не нашли широкого применения для измерения давлений, меньших 10^8 Па. К примеру, коэффициент гидростатического давления (КГД) S_p пленочного датчика из GaAs при концентрации носителей $3 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$ составляет $2,5 \cdot 10^{-10} \text{ Па}^{-1}$ [5]. ($S_p = \Delta R / R_0 \Delta p$, где ΔR — приращение сопротивления; R_0 — начальное сопротивление; Δp — коэффициент изменения сопротивления на единицу давления.)

ЧЭ на основе НК и тонких пленок, благодаря малым размерам и совершенной кристаллической структуре, обладают высокими динамическими параметрами и поэтому являются перспективными для создания датчиков импульсных давлений. Однако низкая чувствительность, нелинейность и температурная зависимость сдерживают их широкое применение для этих целей. В то же время датчики на основе НК довольно широко применяются для измерения динамических деформаций [6–8].

Целью нашей работы стал поиск путей повышения чувствительности к давлению ЧЭ на основе НК GaAs и Te за счет специального легирования кристаллов в процессе их выращивания, выбора оптимальной геометрии ЧЭ, а также конструктивных решений, позволяющих повысить уровень механических напряжений, возникающих в ЧЭ при воздействии внешнего давления. Ставилась также задача упрощения методики динамической градуи-

ровки датчиков. Все это должно, по мнению авторов, обеспечить эффективность применения датчиков на основе НК для измерения импульсных давлений.

Нитевидные кристаллы, предназначенные для изготовления чувствительных элементов, выращивались из газовой фазы методом химических транспортных реакций [9]. Этот метод позволяет легировать кристаллы различными примесями в широком диапазоне концентраций в процессе выращивания.

Полученные сильнолегированные и компенсированные НК n -GaAs имели нитевидную форму с ориентацией $\langle 111 \rangle$ или форму тонких лент, ориентированных вдоль кристаллографического направления $\langle 112 \rangle$ и ограненных плоскостями $\{111\}$. Размеры образцов — $(0,01 \dots 0,03) \times (0,1 \dots 0,2) \times (1 \dots 2)$ мм. Ленточные кристаллы n -типа, легированные Si и Zn, обладали концентрацией свободных носителей $\sim 3 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$, их подвижность составляла $200 \text{ см}^2 / (\text{В} \cdot \text{с})$, удельное сопротивление $\sim 0,1 \text{ Ом} \cdot \text{см}$. Номиналы сопротивлений изменялись при этом в пределах 30...150 Ом. Зависимость сопротивления от приложенного давления близка к экспоненциальной (рис. 1). Среднее значение КГД в диапазоне

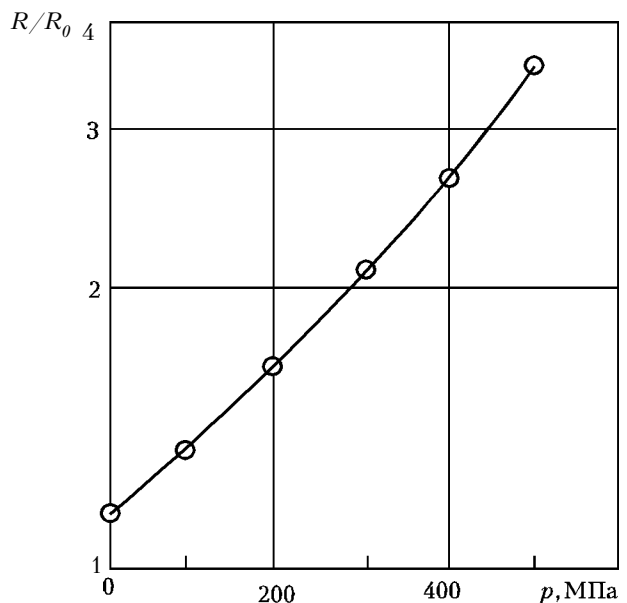


Рис. 1. Зависимость сопротивления датчиков из ленточных кристаллов n -GaAs от давления

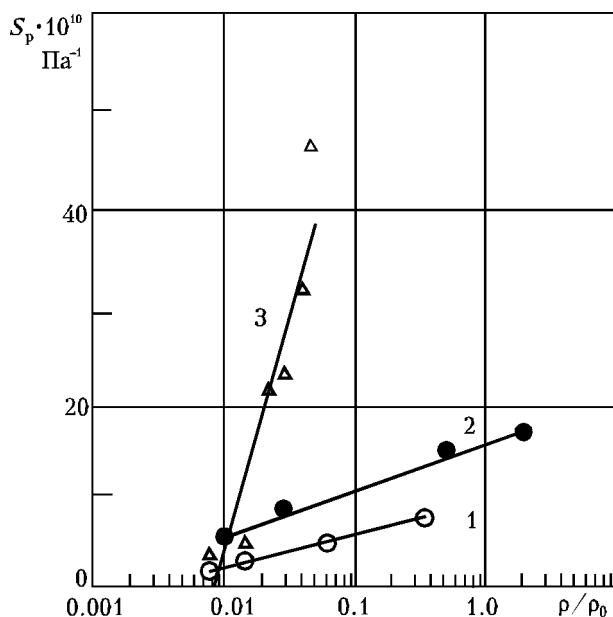


Рис. 2. Зависимость коэффициента гидростатического давления от удельного сопротивления НК GaAs: 1 – НК, легированные мелкими донорными примесями; 2 – специально не легированные НК; 3 – НК, легированные серой

0...500 МПа составляет $46 \cdot 10^{-10} \text{ Па}^{-1}$, превышая параметры известных датчиков (например для GaAsP $S_p = 30 \cdot 10^{-10} \text{ Па}^{-1}$ [2], а для датчика на основе туннельного диода $S_p = (7...21) \cdot 10^{-10} \text{ Па}^{-1}$ [10]). В интервале температур 213...373 К сопротивление датчиков изменяется в пределах двух процентов, их ТКС в этом диапазоне составляет $6 \cdot 10^{-4} \text{ К}^{-1}$, что меньше, чем в пленочном GaAs [5].

Повышенная чувствительность к давлению ленточных кристаллов $n\text{-GaAs} < \text{Si}, \text{Zn} >$ достигается за счет сильного легирования и компенсации (степень компенсации превышает 0,95) и влияния давления на потенциальный рельеф, образованный легирующими и компенсирующими примесями. Показано, что изменяя степень компенсации можно добиться изменения электрических параметров кристаллов, в частности КГД, в широких пределах [11].

На рис. 2 приведены зависимости КГД от удельного сопротивления (которое зависит от уровня легирования) $n\text{-GaAs}$ для различных условий легирования: мелкие донорные примеси (1), специально не легированные образцы – основная примесь Si (2); образцы с самокомпенсацией, легированные серой (3). Из рисунка видно, как за счет легирования можно управлять величиной КГД.

Нитевидные кристаллы Te, выращенные из газовой фазы, обладают большим разнообразием внешних форм и довольно сильной анизотропией электросопротивления и тензосвойств. Проведенные исследования зависимости сопротивления образцов различной геометрии от приложенного давления p приведены на рис. 3. Кривые 1 и 2 представляют

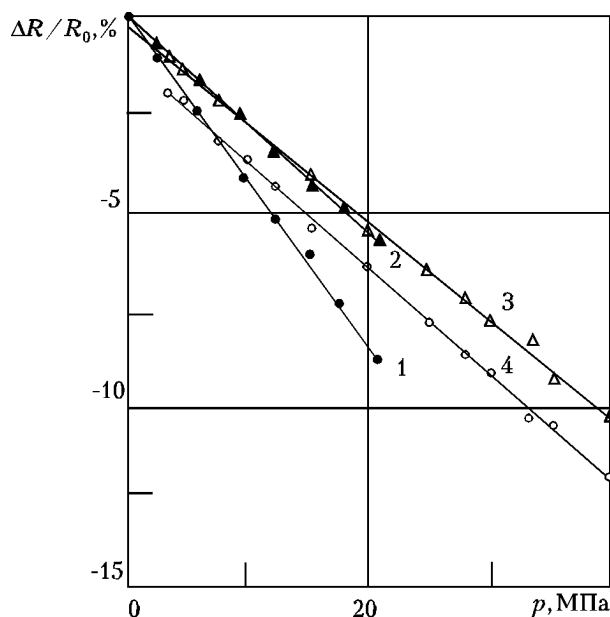


Рис. 3. Зависимость относительного изменения сопротивления НК Te различной морфологии: 1 – длинный НК; 2 – короткий НК; 3 – трубчатый НК; 4 – пластинчатый НК

результаты измерений на длинных (6...8 мм) и коротких (1...2 мм) образцах, соответственно. Кривые 3 и 4 получены для датчиков, изготовленных из пластинчатого и трубчатого кристаллов, соответственно. Влияние геометрии на величину КГД проявляется как через структуру НК, так и через анизотропию электросопротивления, при этом максимальные значения КГД достигают $40 \cdot 10^{-10} \text{ Па}^{-1}$ ($\Delta p = 20 \text{ МПа}$).

Значительная анизотропия электрических и тензосвойств НК Te позволяет достичь повышения чувствительности к всестороннему сжатию путем формирования сложного анизотропного напряженного состояния ЧЭ за счет использования концентраторов напряжений. Для этой цели использовались НК Te трубчатой формы с гексагональной внешней гранкой, ориентированные вдоль кристаллографической оси [0001]. ЧЭ, изготовленные из таких НК, представляют собой трубчатые кристаллы длиной от 0,5 до 2 мм с внешним диаметром 0,12...0,28 мм и внутренним диаметром 0,07...0,18 мм. Образцы герметизировались с торцов заглушками из электроизолирующего материала. Токовыводы создавались путем импульсной приварки золотой микропроволоки [12].

Образованная в результате герметизации ЧЭ закрытая полость, являясь концентратором напряжений, обуславливает неоднородное сложно-напряженное состояние ЧЭ в условиях воздействия на его поверхность однородного изотропного давления p . Поскольку материал обладает значительной анизотропией тензосвойств, чувствительность датчи-

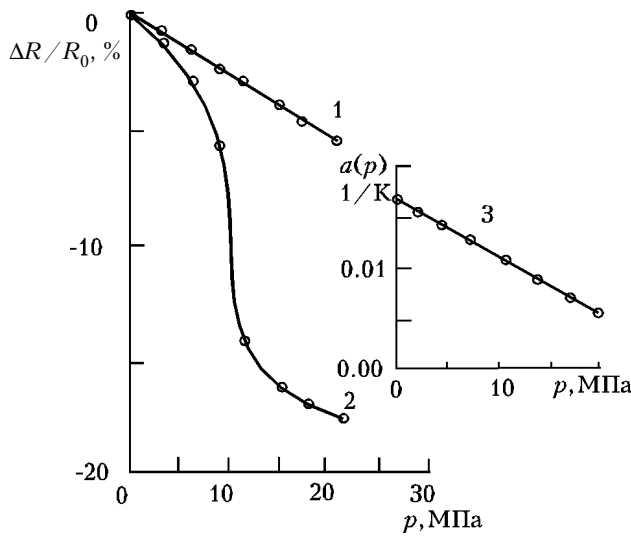


Рис. 4. Градуировочные характеристики датчиков гидростатического давления из НК Те: 1 — трубчатый кристалл; 2 — трубчатый кристалл, герметизированный с торцов; 3 — зависимость температурного коэффициента α от давления

ков к давлению повышается в несколько раз (до 10). На рис. 4 показаны градуировочные характеристики такого датчика без герметизации (кривая 1) и с герметизацией (кривая 2).

Датчик позволяет измерять сравнительно невысокие давления (2...15 МПа). Для оптимизации геометрии и обеспечения надежной работы в диапазоне измеряемых давлений ЧЭ использовались соотношения

$$\frac{r_1}{r_2} \leq \sqrt{\frac{[\sigma] - p_m}{[\sigma] + p_m}}, \quad (1)$$

где r_1 и r_2 — внутренний и внешний радиусы трубки; $[\sigma]$ — предел прочности материала ЧЭ; p_m — заданный верхний предел измеряемого давления.

Использование НК Si, обладающих высоким продольным тензоэффектом, в качестве струны вибро-частотного преобразователя позволяет создавать высокочувствительные мембранные датчики давления для диапазона 0...3 МПа. Длина струны такого датчика равна 3 мм, а диаметр — 15 мкм. Частота собственных колебаний составляет около 50 кГц [13].

Статическая градуировка датчиков осуществлялась в установке высокого давления УВД-15000. Измеренные градуировочные характеристики представлялись в виде зависимостей

$$\frac{\Delta R}{R_0} = f_s(p, T). \quad (2)$$

Здесь $\Delta R = R - R_0$ — приращение сопротивления ЧЭ, обусловленное давлением p .

Статическая градуировочная характеристика датчика из трубчатого НК теллура, полученная при температуре $T_0 = 300$ К, показана на рис. 4. Для датчиков этого типа в диапазоне температур 290...310 К

характеристики с точностью до 1,5 % аппроксимируются функциями

$$f_s(p, T) = f_s(p, T_0)(1 + \alpha(p)(T - T_0)), \quad (3)$$

где α — температурный коэффициент.

Измеренная зависимость $\alpha(p)$, показанная на рис. 4, аппроксимируется прямой

$$\alpha(p) = ap + b, \quad (4)$$

где $a = -5,516 \cdot 10^{-10} (\text{К} \cdot \text{Па})^{-1}$, $b = 0,0172 \text{ К}^{-1}$.

Важным моментом в создании датчиков для измерения динамических давлений является установление их динамических градуировочных характеристик. Реализация этого осложняется тем, что при динамическом нагружении выходной сигнал датчика в каждый момент времени t определяется не только актуальным значением давления $p(t)$, но и ходом его изменения. Это будет проявляться в зависимости выходного сигнала от скорости изменения давления \dot{p} .

$$\frac{\Delta R}{R_0} = f_d(p, \dot{p}, T). \quad (5)$$

Температура ЧЭ также зависит от скорости нагружения датчика вследствие механокалорического эффекта — $T = T(p, \dot{p}; t)$.

Таким образом, для установления градуировочной характеристики вида (5) необходимо выполнить измерения при различных скоростях изменения внешнего давления. При этом резко возрастают требования к аппаратуре, которая должна обладать соответствующими возможностями задания нестационарных давлений в широких диапазонах их абсолютных значений и скоростей изменения. Все это существенно повышает стоимость динамической градуировки датчиков давления, следовательно, и самих датчиков.

Стоимость динамической градуировки можно было бы существенно снизить, если бы удалось каким-либо образом получить градуировочную характеристику (5) исходя лишь из результатов статической градуировки или хотя бы ограничить количество градуировочных циклов, выполняемых при различных скоростях нагружения, одним — двумя.

Предлагаемый метод состоит в том, чтобы использовать результаты статической градуировки совместно с математической моделью деформирования ЧЭ, которая учитывает как различные режимы его нагружения, так и изменения температуры при динамическом деформировании ЧЭ.

Относительное изменение сопротивления нагруженного датчика можно представить в виде интеграла:

$$\frac{\Delta R}{R_0} = \iiint_V \sum_{i,j,k,l=1}^3 g_{ij} \Pi_{ijkl} \sigma_{kl} dV, \quad (6)$$

где Π_{ijkl} и σ_{kl} — компоненты тензоров пьезосопротивления и механических напряжений, соответственно;

g_{ij} — функции координат, учитывающие геометрию ЧЭ, расположение электродов и т. п.

Интегрирование в формуле (6) распространяется на область пространства V , занятую ЧЭ. Нелинейность и температурную зависимость градуировочной характеристики учитываем, принимая в формуле (6) $\Pi_{ijkl} = \Pi_{ijkl}(\sigma_{mn}, T)$.

Предположим, что функции g_{ij} и зависимость $\Pi_{ijkl}(\sigma_{mn}, T)$ известны. Тогда, решив соответствующую краевую задачу статической теории упругости при заданном постоянном давлении p и найдя таким образом распределение напряжений $\sigma_{mn} = \sigma_{mn}(p, \mathbf{r})$, $\mathbf{r} \in V$ в объеме ЧЭ, по формуле (6) можно вычислить приращение сопротивления датчика, обусловленное приложенным давлением p . Пропедев то же самое для всех значений давления p и температуры T из некоторого диапазона, можно рассчитать статическую градуировочную характеристику (2).

С другой стороны, если известна градуировочная характеристика $f_s(p, T)$, то, используя ее совместно с соотношением (6), приходим к интегральному уравнению

$$f_s(p, T) = \iiint_V \sum_{i,j,k,l=1}^3 g_{ij} \Pi_{ijkl}(\sigma_{mn}(p, \mathbf{r}), T) \sigma_{kl}(p, \mathbf{r}) dV \quad (7)$$

относительно неизвестных функций

$$S_{kl}(\sigma_{mn}, T) = \sum_{i,j} g_{ij} \Pi_{ijkl}(\sigma_{mn}, T).$$

В установленных таким образом зависимостях $S_{kl}(\sigma_{mn}, T)$ будут учтены интегрально возможные вариации физических и геометрических параметров ЧЭ, отклонение реальных условий нагружения от принятой модели. Благодаря этому будет уменьшена погрешность градуировки по сравнению со случаем, когда зависимости $\Pi_{ijkl}(\sigma_{mn}, T)$ определяются путем прямых физических измерений. Таким образом, коэффициенты $S_{kl}(\sigma_{mn}, T)$ можно рассматривать как некие подгоночные параметры, призванные минимизировать различие между математической моделью датчика и его реальным поведением в статике.

Соотношение (6) справедливо также и в случае нестационарного нагружения, с тем отличием, что в этом случае тензор напряжений становится функцией времени $\sigma_{mn} = \sigma_{mn}(p, \dot{p}, \mathbf{r}, t)$ и возникает обусловленное динамическим сжатием неоднородное нестационарное температурное поле. С учетом этого получаем следующее интегральное соотношение между измеряемым выходным сигналом датчика и приложенным давлением $p=p(t)$:

$$f_d(p, \dot{p}, T) = \iiint_V \sum_{k,l=1}^3 S_{kl}(\sigma_{mn}(p, \dot{p}, \mathbf{r}, t), T(p, \dot{p}, \mathbf{r}, t)) \sigma_{kl}(p, \dot{p}, \mathbf{r}, t) dV. \quad (8)$$

Функции $S_{kl}(\sigma_{mn}, T)$ в (8) могут быть установлены исходя из результатов статической градуировки путем решения интегрального уравнения (7), а функции $\sigma_{mn}(p, \dot{p}, \mathbf{r}, t)$ и $T(p, \dot{p}, \mathbf{r}, t)$ можно найти, решая соответствующую динамическую задачу термоупругости при заданном законе нагружения $p(t)$, следовательно, формула (8) позволяет рассчитать динамическую градуировочную характеристику.

Рассмотрим пример применения разработанного метода градуировки для простейшего случая квазистатического нагружения, когда зависимость тензора напряжений от времени и координат представляется как $\sigma_{mn} = \sigma_{mn}(p(t), \mathbf{r})$. Этот случай реализуется, если спектр собственных частот механических колебаний датчика находится выше по шкале частот частотного спектра импульса давления $p(t)$. Тогда, полагая вариации температуры ЧЭ, обусловленные его динамической деформацией, достаточно малыми, представим правую часть (5) в виде разложения по T в окрестности температуры среды T_{c0} в момент времени, предшествующий воздействию импульса давления, и ограничимся линейным членом

$$f_d(p, \dot{p}, T) = f_s(p, T_{c0})(1 + \alpha(p)(T(p, \dot{p}) - T_{c0})), \quad (9)$$

Интегрируя дифференциальное уравнение теплообмена [14] в системе «ЧЭ — среда» при начальных условиях $T=T_{c0}$, получаем

$$T(p, \dot{p}) - T_{c0} = \exp\left(-\frac{h}{c}t\right) \left(\frac{q}{c}\right) \int_0^t \dot{p} \exp\left(\frac{h}{c}t\right) dt, \quad (10)$$

где c — теплоемкость датчика;

h — коэффициент теплообмена ЧЭ с внешней средой;

q — параметр, учитывающий механокалорический эффект, возникающий при динамическом деформировании ЧЭ.

С учетом (10), формула (9) приобретает окончательный вид:

$$f_d(p, \dot{p}, T_{c0}) = f_s(p, T_{c0}) \left(1 + \frac{\alpha(p)}{\alpha_0} \frac{1}{\tau \lambda} \exp\left(-\frac{t}{\tau}\right) \int_0^t \dot{p} \exp\left(\frac{t}{\tau}\right) dt\right), \quad (11)$$

где $\tau = c/h$, $\lambda = (q/\alpha_0)^{-1}$, $\alpha_0 = \alpha(p_0)$.

Согласно (11), отклонение градуировочной характеристики $f_d(p, \dot{p}, T_{c0})$ от статической характеристики $f_s(p, T_{c0})$ определяется функцией $\alpha(p)$ и двумя параметрами — τ , λ . Функция $\alpha(p)$, как и $f_s(p, T_{c0})$, определяется исходя из данных статической градуировки датчика при нескольких температурах. Постоянную времени тепловой релаксации τ , а также теплоемкость c можно определить экспериментально, используя известные методики теплофизических измерений. Что касается параметра q , то его можно рассчитать исходя из термодинамических свойств материала [14, с. 87]. Следовательно, параметры τ , λ можно установить, не прибегая к динамической градуировке. Однако для повышения точности измерений параметры τ , λ можно определить

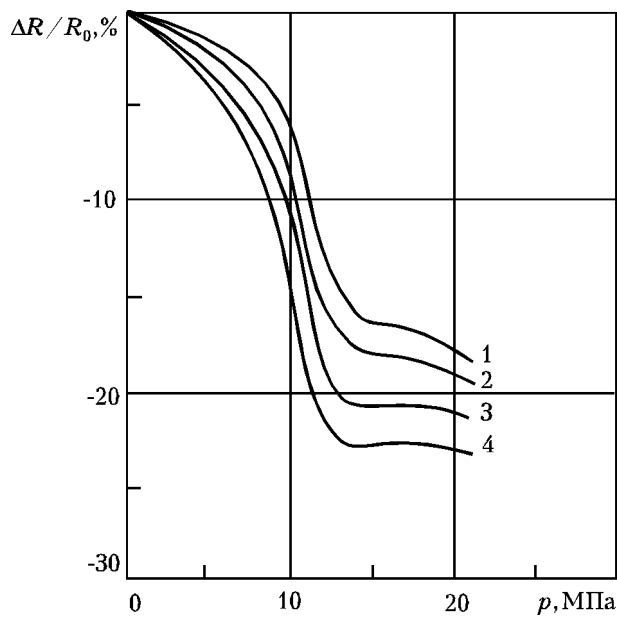


Рис. 5. Зависимость относительного изменения сопротивления датчика из трубчатого НК Те при различных скоростях изменения давления

так, чтобы достичь минимального различия между измеренным сигналом и функцией (11) при каком-либо заданном законе давления $p(t)$. Определенные таким образом параметры будут компенсировать возможные отклонения математической модели датчика от его поведения в динамике.

На рис. 5 показаны зависимости относительно изменения сопротивления датчика от давления при различных постоянных скоростях нарастания давления, рассчитанные по формуле (11). Кривые 1–4 соответствуют значениям $\dot{p}/\lambda = 0; 0,2; 0,5; 0,8$.

В рассмотренном простом примере не учитывались неоднородность температуры ЧЭ, вариации температуры среды, влияние давления на коэффициент теплообмена. Учет всех этих факторов не сопряжен с какими-либо принципиальными трудностями и приведет лишь к более сложной, по сравнению с (11), функциональной зависимости $f_d(p, \dot{p}, T_{c0})$, которая будет содержать, вместе с коэффициентами τ и λ , и другие параметры.

Таким образом, используя сильнолегированные и компенсированные НК GaAs, а также НК теллура различных морфологических форм — игольчатые, пластинчатые и НК трубчатой формы, можно в несколько раз (до 10) повысить чувствительность датчиков в области низких давлений. Применяя к этим

датчикам разработанную методику, можно ограничиться измерениями в статике и одним — двумя циклами динамического нагружения. Это позволяет повысить эффективность использования полупроводниковых датчиков на основе НК для измерения импульсных давлений.

ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ

1. Czaputowich E. Electrooporowe mierniki wyookich cisien // Pomiar. Automatyka. Kontrola. — 1969. — N 11. — P. 472.
2. Пат. 3270562 США. Solid state hydrostatic pressure gauge / A. Ehrenreich, G. E. Fenner. — Оpubл. 06.09.1966.
3. Бернотас К. Э., Колтаков В. К., Кудряшов Э. И. и др. Полупроводниковые датчики давления на основе кристаллов $Al_xGa_{1-x}As$ // П и СУ. — 1988. — № 11. — С. 24–26.
4. Марьямова И. И., Сыдир Б. И., Екимов Ю. С. Полупроводниковые датчики на основе антимонида галлия для измерения больших давлений // П и СУ. — 1981. — № 3. — С. 35.
5. Vyas M. K. R. Gallium arsenide pressure sensor // High temperatures High pressures. — 1974. — Vol. 6. — P. 237–240.
6. Абрамчук Г. А., Алехин В. А., Дергачева В. Г. Нитевидный кремниевый тензорезистор для регистрации импульсных процессов // ПТЭ. — 1977. — № 2. — С. 217–218.
7. Абрамчук Г. А. Тензочувствительность нитевидных кремниевых тензорезисторов к импульсным упругим волнам деформации в интервале температур $-50...110^\circ\text{C}$ // ПТЭ. — 1978. — № 1. — С. 181–182.
8. Абрамчук Г. А., Чекурин В. Ф. Чувствительность нитевидных кремниевых тензорезисторов к скорости деформации в диапазоне $50...420\text{ c}^{-1}$ // Проблемы прочности. — 1985. — № 4. — С. 119–120.
9. Гиваргизов Е. Н. Рост нитевидных и пластинчатых кристаллов из пара. — М.: Наука, 1977.
10. Коврыжных Н. А., Криворотов Н. П., Перегуд В. И. и др. Датчик с $p-n$ -переходом для измерения статических и импульсных давлений // Вопросы атомной науки и техники. Электрофизическая аппаратура. — Л.: 1985. — № 22. — С. 90–92
11. Варшава С. С., Сыдир Б. И. Влияние гидростатического давления на электросопротивление нитевидных кристаллов арсенид галлия // ФТП. — 1981. — № 11. — С. 2247–2249.
12. А. с. 1273988 СССР. Датчик гидростатического давления / С. С. Варшава, Б. И. Сыдир, В. Ф. Чекурин. — Оpubл. в Б. И., 1986, № 44.
13. Baitsar R., Voronin V., Krasnogenov E., Bogdanova N. Operation of monocrystalline resonator in a measuring circuit // Sensors and actuators. A. — 1992. — N 1–2. — P. 175–178.
14. Новацкий В. Теория упругости. — М.: Мир, 1975.