УДК 621.315.592 DOI: 10.15222/TKEA2015.4.19

Д. т. н. А. А. ДРУЖИНИН, к. т. н. И. И. МАРЬЯМОВА, к. т. н. А. П. КУТРАКОВ, к. т. н. Н. С. ЛЯХ-КАГУЙ

Украина, Национальный университет «Львовская политехника»
E-mail: druzh@polynet.lviv.ua

ДАТЧИК ГИДРОСТАТИЧЕСКОГО ДАВЛЕНИЯ НА ОСНОВЕ МИКРОКРИСТАЛЛОВ АНТИМОНИДА ГАЛЛИЯ

Исследовано влияние гидростатического давления (до 5000 бар) на сопротивление нитевидных кристаллов антимонида галлия n-типа, легированных селеном или теллуром. Определена величина коэффициента гидростатического давления для этих кристаллов: $K_Г = (16{,}5-20{,}0)\cdot10^{-5}$ бар$^{-1}$ при 20°С. Исследовано влияние температуры в диапазоне от −60 до +60°С на сопротивление и коэффициент $K_Г$ этих кристаллов. Рассмотрена возможность уменьшения температурной зависимости сопротивления путем закрепления чувствительного элемента датчика на подложках из различных материалов с различным коэффициентом линейного термического расширения. Приведена конструкция разработанного датчика и его основные характеристики.

Ключевые слова: антимонид галлия, датчик, гидростатическое давление.

В настоящее время кремний и германий, самые распространенные материалы в производстве дискретных полупроводниковых приборов и интегральных схем, не всегда удовлетворяют всем требованиям, предъявляемым к чувствительным элементам датчиков механических величин. Поэтому вполне закономерным является поиск и исследование свойств других полупроводниковых материалов для использования их в качестве чувствительных элементов таких датчиков. Для этой цели перспективными являются полупроводниковые соединения A^3B^5 [1].

Для измерения высоких давлений используются датчики, в которых давление измеряемой среды воспринимается мембраной, на которой расположены тензорезисторы, выполненные по различной технологии. В качестве примера можно привести общепромышленные датчики давления типа DMP 304 компании BD Sensors [2], которые предназначены для измерения сверхвысоких давлений (до 6000 бар). Тензомодуль этих датчиков выполнен из монокристаллического кремния, в котором сформирован мост из диффузионных тензорезисторов, а стальная мембрана приваривается к корпусу тензомолуля.

К недостаткам мембранных датчиков давления можно отнести сложность конструкции, а также малое быстродействие и узкий диапазон измеряемых давлений, обусловленный конструктивными особенностями мембраны, а датчиков тензометрического типа с различными упругими элементами — еще и гистерезис и нелинейность выходных характеристик, обусловленные несовершенством механических свойств упругих элементов и связующего для крепления тензорезисторов на упругих элементах.

Для измерения больших значений давления, достигающих тысяч бар, целесообразно использовать датчики гидростатического давления, которые не требуют создания сложных конструкций с упругими элементами, поскольку давление через жидкость передается непосредственно на чувствительный элемент датчика.

Известны датчики всестороннего давления на основе твердых растворов арсенида галлия и алюминия $Al_xGa_{1-x}As$ [3—5]. В то же время, судя по литературным данным [6—8], можно сделать вывод о достаточно высокой чувствительности антимонида галлия *n*-типа проводимости к гидростатическому давлению. Исходя из этого, нами были проведены исследования, направленные на создание датчика гидростатического давления на основе антимонида галлия.

Исследование влияния гидростатического давления на параметры нитевидных кристаллов GaSb

Нитевидные кристаллы (НК) GaSb *n*-типа, выращенные методом химических газотранспортных реакций, подвергались воздействию гидростатического давления в специально изготовленном сосуде давления. Давление создавалось в установке высокого давления УВД-15000 (г. Киев, завод «Эталон»).

Из градуировочных характеристик, приведенных на **рис. 1**, *а*, видно, что для НК GaSb, легированных теллуром и селеном, при комнатной температуре (T = 20°С) зависимость относительного изменения сопротивления от величины гидростатического давления в исследованном диапазоне давлений (до 5000 бар) носит линейный характер.

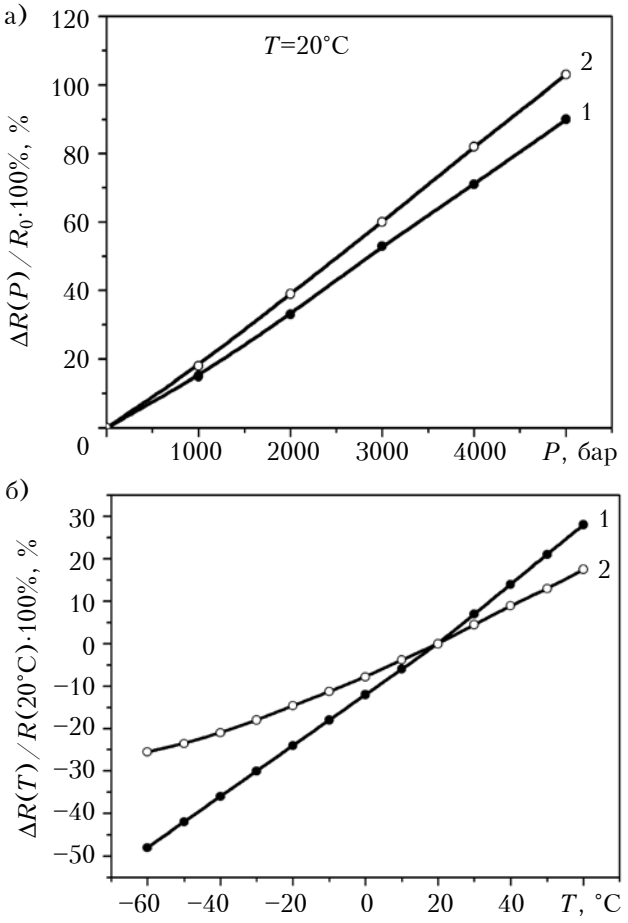

Рис. 1. Зависимости относительного изменения сопротивления НК GaSb *n*-типа, легированных теллуром (*1*) и селеном (*2*), от гидростатического давления (*а*) и от температуры (*б*)

Коэффициент гидростатического давления рассчитывался с использованием этих данных по формуле

$$K_\Gamma = \frac{1}{P}\frac{\Delta R(P)}{R_0}, \qquad (1)$$

где P — гидростатическое давление;

R_0 — начальное сопротивление кристалла;

$\Delta R(P)$ — изменение сопротивления кристалла под воздействием гидростатического давления, $\Delta R(P)=R(P)-R_0$.

Значения коэффициента гидростатического давления при 20°C, определенные из этих характеристик, составляют $16{,}5\cdot10^{-5}$ бар$^{-1}$ для НК GaSb, легированных теллуром, и $20\cdot10^{-5}$ бар$^{-1}$ для НК GaSb, легированных селеном.

Далее исследовалась зависимость коэффициента гидростатического давления K_Γ от температуры в диапазоне от −60 до +60°C. Из приведенных на **рис. 2** результатов видно, что с повышением температуры чувствительность образцов уменьшается.

Температурный коэффициент чувствительности к гидростатическому давлению вычислялся с использованием рис. 2 по формуле

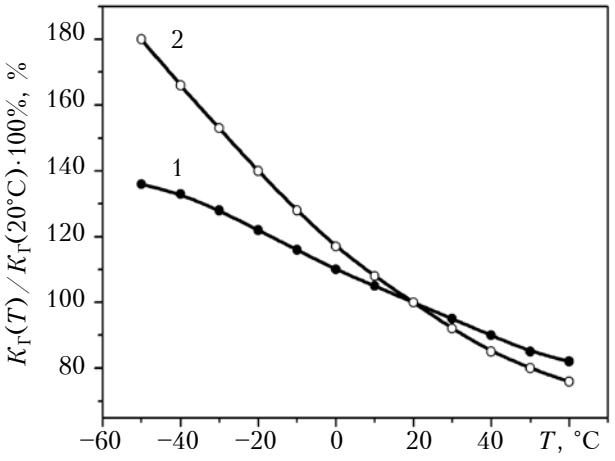

Рис. 2. Температурная зависимость относительного значения коэффициента гидростатического давления НК GaSb *n*-типа, легированных теллуром (*1*) и селеном (*2*)

$$S = \frac{1}{\Delta T}\frac{\Delta K_\Gamma(T)}{K_\Gamma(T_0)},$$

где $\Delta K_\Gamma(T)=K_\Gamma(T)-K_\Gamma(T_0)$;

$\Delta T=T-T_0$.

Для кристаллов, легированных теллуром, были получены значения $S=-(0{,}4\ldots0{,}5)\%\cdot°C^{-1}$. Для НК GaSb, легированных селеном, наблюдается более сильная зависимость коэффициента гидростатического давления от температуры, в этом случае $S=-(0{,}70\ldots0{,}95)\%\cdot°C^{-1}$.

Из приведенных на рис. 1, *б* данных видно, что в диапазоне от −60 до +60°C, кристаллы, легированные селеном, имеют более слабую зависимость сопротивления от температуры, чем легированные теллуром. Температурный коэффициент сопротивления (**ТКС**) определялся по формуле

$$\alpha = \frac{1}{\Delta T}\frac{\Delta R(T)}{R_0},$$

где $\Delta R(T)=R(T)-R_0$.

Для кристаллов, легированных теллуром, были получены значения $\alpha=0{,}5\ldots0{,}7$ %·°C^{-1}, легированных селеном — $\alpha=0{,}30\ldots0{,}41$ %·°C^{-1}.

Следует отметить, что температурная зависимость сопротивления НК GaSb, а следовательно, и величина их ТКС определяются в основном концентрацией легирующей примеси — селена или теллура, а значит, изменяя ее, можно подобрать кристаллы GaSb с оптимальной температурной зависимостью сопротивления.

Сопротивление чувствительных элементов — НК GaSb — в значительной степени зависит от значения тока I, протекающего через кристалл, т. е. от рассеиваемой на чувствительном элементе мощности (**рис. 3**). Повышение сопротивления, обусловленное саморазогревом чувствительных элементов, находящихся в воздушной среде, начинается при мощности рассеивания пример-

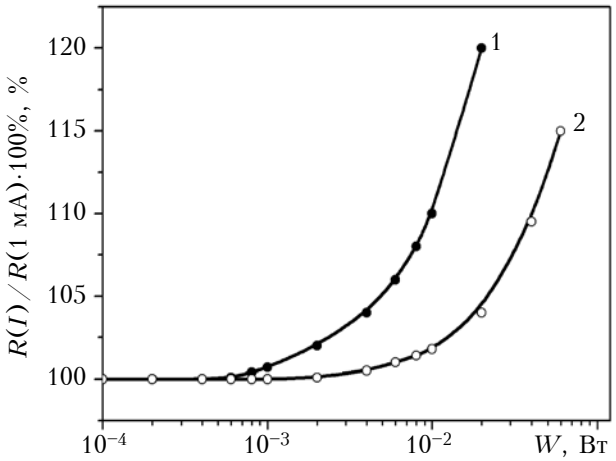

Рис. 3. Зависимость относительного сопротивления НК GaSb *n*-типа от рассеиваемой мощности в различных средах:
1 — в воздухе; *2* — в техническом масле

но $1\cdot10^{-3}$ Вт, в жидкой среде — при $1\cdot10^{-2}$ Вт. Это ограничивает значение рабочего тока величиной 3 мА в первом случае и 10 мА во втором при условии, что сопротивление кристаллов не превышает 100 Ом.

Разработка датчика гидростатического давления на основе НК GaSb

Было разработано несколько вариантов конструкции датчика гидростатического давления с чувствительным элементом **(ЧЭ)** на основе антимонида галлия, одна из которых приведена на **рис. 4**. Датчик представляет собой металлический корпус *1*, через тело которого проходит изолированный герметичный токовывод *2*. Для защиты чувствительного элемента *3* от механических повреждений использован защитный колпачок *4*, изготовленный из тефлона.

Результаты градуировки датчика, которая проводилась при I=1 мА, приведены на **рис. 5**. Из графиков следует, что в зависимости от условий эксплуатации схемы преобразования изменения сопротивления в выходной сигнал датчика требуют обеспечения термокомпенсации выходных характеристик.

Уменьшить температурную зависимость сопротивления датчика гидростатического давле-

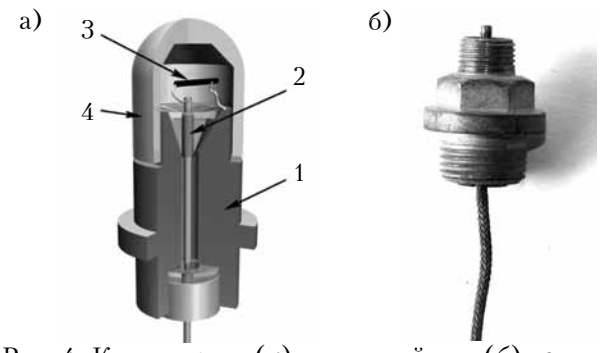

Рис. 4. Конструкция (*а*) и внешний вид (*б*) датчика гидростатического давления:
1 — корпус; *2* — токовывод; *3* — чувствительный элемент; *4* — защитный колпачок

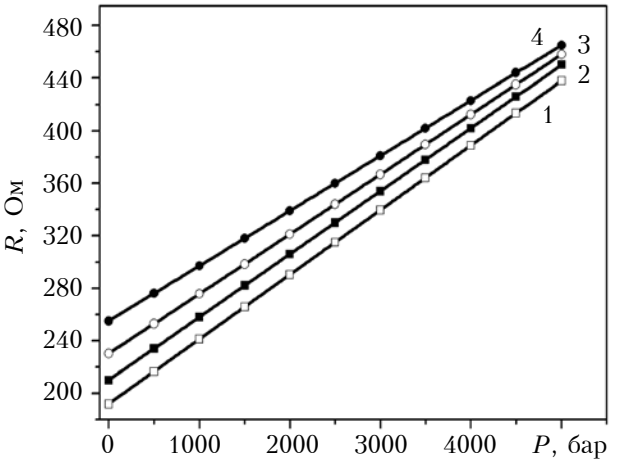

Рис. 5. Зависимость сопротивления ЧЭ датчика от давления при разных значениях температуры (в °С):
1 — 0; *2* — 20; *3* — 40; *4* — 60

ния можно путем закрепления чувствительного элемента на подложке из материала с соответствующим коэффициентом термического линейного расширения α_L, отличающимся от α_L НК GaSb, равного $6{,}2\cdot10^{-6}$ °С$^{-1}$.

На **рис. 6** приведены температурные зависимости относительного изменения сопротивления чувствительных элементов датчиков давления — свободных и закрепленных на различных подложках, а именно: из стали ($\alpha_L=12\cdot10^{-6}$ °С$^{-1}$), никеля ($\alpha_L=13\cdot10^{-6}$ °С$^{-1}$), меди ($\alpha_L=16{,}7\cdot10^{-6}$ °С$^{-1}$) и дюралюминия ($\alpha_L=23\cdot10^{-6}$ °С$^{-1}$). Здесь видно, что при закреплении ЧЭ на подложке может изменяться не только значение температурного коэффициента сопротивления, но и его знак (на подложке из дюралюминия, кривая *5*). Наименьший ТКС — примерно 0,05 %·°С$^{-1}$ — получен при использовании медной подложки.

Для более полной компенсации температурной погрешности дополнительно можно использовать датчик температуры на основе НК крем-

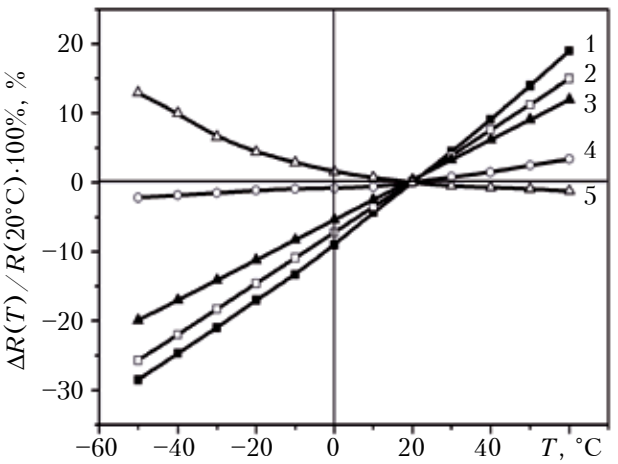

Рис. 6. Температурная зависимость относительного изменения сопротивления ЧЭ датчика на основе НК GaSb *n*-типа в свободном состоянии (*1*) и при его закреплении на подложках из стали (*2*), никеля (*3*), меди (*4*) и дюралюминия (*5*)

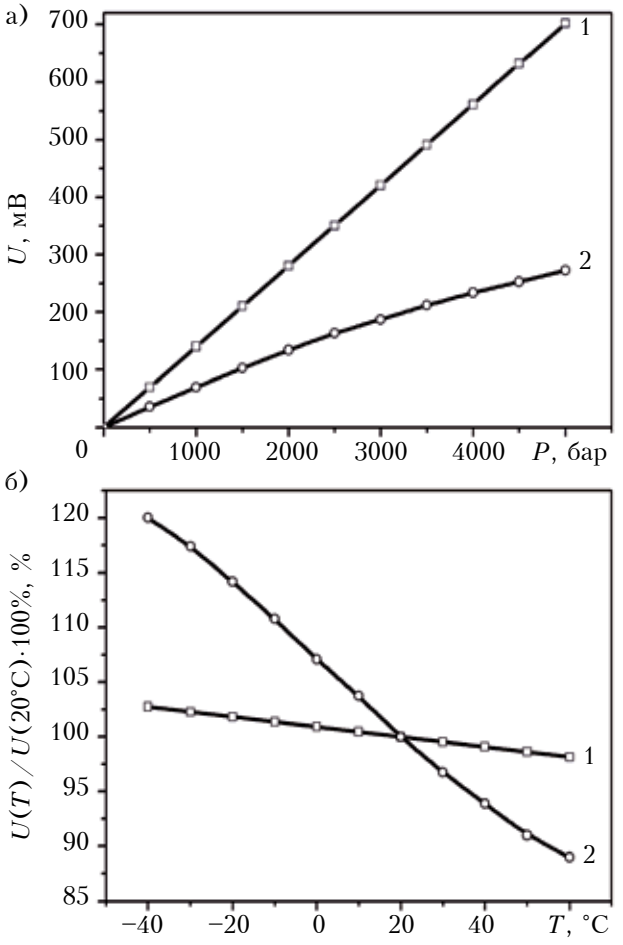

Рис. 7. Зависимость выходного сигнала датчика от давления (*а*) и его температурные характеристики (*б*) для асимметричной (*1*) и симметричной (*2*) мостовой схемы

ния *p*-типа проводимости, который не чувствителен к гидростатическому давлению. Его необходимо закреплять в непосредственной близости от чувствительного элемента датчика давления. При этом необходимо учитывать то, что сопротивление ЧЭ при максимальном давлении (5000 бар) изменяется более чем в два раза при включении его в мостовую схему, а зависимость выходного сигнала от давления имеет нелинейный характер. Этот недостаток можно устранить, используя для питания мостовой схемы источник постоянного тока или асимметричную мостовую схему.

В рассматриваемом датчике оба чувствительных элемента включены в мостовую схему с коэффициентом асимметрии n=9. Для повышения чувствительности асимметричного моста напряжение питания U необходимо увеличить в $(1+n)/2$ раза относительно напряжения питания симметричного моста (это следует из условия равенства допустимой мощности рассеяния на ЧЭ в схемах симметричного и асимметричного мостов). Выходные характеристики датчика гидростатического давления, приведенные на **рис. 7**, свидетельствуют о целесообразности применения асимметричного моста: температурная зависимость чувствительности выходного сигнала датчика уменьшается по сравнению с симметричной схемой почти на порядок.

Заключение

Проведенные исследования указывают на перспективность датчиков гидростатического давления на основе нитевидных кристаллов антимонида галлия *n*-типа. При измерении высоких давлений такие датчики имеют определенные преимущества по сравнению с датчиками давления с полупроводниковыми тензорезисторами, закрепленными на упругих элементах [2, 4, 9], а именно:

— существенное упрощение конструкции датчика за счет отсутствия упругих элементов и необходимости крепления на них тензорезисторов;

— высокая чувствительность к давлению (изменение сопротивления примерно на 18—20% на 1000 бар), постоянная в широком диапазоне высоких давлений;

— улучшение метрологических характеристик датчика за счет отсутствия гистерезиса.

Следует отметить, что разработанный датчик давления по своим параметрам (чувствительность, диапазон измеряемых давлений) не уступает датчикам всестороннего давления на основе твердых растворов арсенида галлия и алюминия [3], а технология его изготовления значительно проще, чем датчика, описанного в [4]. Датчик может найти применение для измерения высоких и экстремально высоких давлений рабочих жидкостей гидравлических систем, для исследования процессов с высоким давлением в химической и нефтехимической промышленности, измерения давления бурового раствора и др.

ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ

1. Дружинін А. О., Мар'ямова І. Й., Кутраков О. П. Датчики механічних величин на основі ниткоподібних кристалів кремнію, германію та сполук A^3B^5. — Львів: Видавництво Львівської політехніки, 2015.

2. http://www.bdsensors.ua/products/product_info.php?id=39

3. Бернотас К. Э. Полупроводниковый датчик импульсного давления // Физика горения и взрыва. — 1986. — Т. 22, № 2. — С. 133—135.

4. Криворотов Н. П., Изаак Т. И., Ромась Л. М. и др. Микроэлектронные сенсоры давления // Вестник Томского госуниверситета. — 2005. — № 285. — С. 139—147.

5. Шимкявичус Ч. С. Первичные преобразователи давления на основе арсенидов галлия-алюминия // Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика. — 2004. — № 2. — С. 35—37.

6. Sagar A. Experimental investigation of conduction band of GaSb // Phys. Rev. — 1960. — Vol. 117. — P. 93—100. — DOI: 10.1103/PhysRev.117.93

7. Keyes R. W., Pollak M. Effect of hydrostatic pressure on the piezoresistance of i-InSb, p-InSb and n-GaSb // Phys. Rev. — 1960. — Vol. 118. — P. 1001—1007. — DOI: 10.1103/PhysRev.118.1001

8. Sagar A., Pollak M., Keyes R. W. Effects of high hydrostatic pressure on the electrical properties of n-type GaSb // Bull. Amer. Phys. Soc. — 1960. — Vol. 5, N 1. — P. 63.

9. Осадчий Е. П. Проектирование датчиков для измерения механических величин. — Москва: Машиностроение, 1979.

Дата поступления рукописи в редакцию 25.05 2015 г.

А. О. ДРУЖИНІН, І. Й. МАР'ЯМОВА, О. П. КУТРАКОВ, Н. С. ЛЯХ-КАГУЙ

Україна, Національний університет «Львівська політехніка»
E-mail: druzh@polynet.lviv.ua

ДАТЧИК ГІДРОСТАТИЧНОГО ТИСКУ НА ОСНОВІ МІКРОКРИСТАЛІВ АНТИМОНІДА ГАЛІЮ

Досліджено вплив гідростатичного тиску (до 5000 бар) на опір ниткоподібних кристалів антимоніда галію n-типу, легованих селеном або телуром. Визначено величину коефіцієнта гідростатичного тиску для цих кристалів: $K_Г = (16,5-20,0)\cdot10^{-5}$ бар$^{-1}$ при 20°С. Досліджено вплив температури в діапазоні від −60 до +60°С на опір та на коефіцієнт $K_Г$ цих кристалів. Розглянуто можливість зменшення температурної залежності опору шляхом закріплення чутливого елемента датчика на підкладках з різних матеріалів з різним коефіцієнтом лінійного термічного розширення. Наведено конструкцію розробленого датчика і його основні характеристики.

Ключові слова: антимонід галію, датчик, гідростатичний тиск.

DOI: 10.15222/TKEA2015.4.19
UDC 621.315.592

A. A. DRUZHININ, I. I. MARYAMOVA, A. P. KUTRAKOV, N. S. LIAKH-KAGUY

Ukraine, Ukraine, Lviv National University «Lviv Polytechnic»
E-mail: druzh@polynet.lviv.ua

SENSOR OF HYDROSTATIC PRESSURE BASED ON GALLIUM ANTIMONIDE MICROCRYSTALS

Currently, silicon and germanium, the most common materials in the production of discrete semiconductor devices and integrated circuits, do not always meet all the requirements to the sensing elements of mechanical quantities sensors. Therefore, it is logical to research the properties of other semiconductor materials that could be used as sensing elements in such sensors. A^3B^5 semiconductor compounds seem promising for such purpose.

Effect of hydrostatic pressure up to 5000 bar on the resistance of n-type antimonide gallium whiskers doped by Se or Te was studied. Coefficient of hydrostatic pressure for this crystals was determined, it equals $K_h = (16,5-20,0)\cdot10^{-5}$ bar^{-1} at 20°C. Temperature dependence of resistance and coefficient K_h for this crystals in the temperature range ±60°C was studied. Design of the developed hydrostatic pressure sensor based on GaSb whiskers and its characteristics are presented. The possibility to decrease the temperature dependence of sensitive element resistance by mounting GaSb whiskers on the substrates fabricated from materials with different temperature coefficient of expansion was examined. It was shown that mounting of GaSb crystals on Cu substrate gives the optimal result, in this case the temperature coefficient decrease to 0,05%·°C^{-1}, that leads to decrease of output temperature dependence. The main advantages of developed pressure sensor are: the simplified design in comparison with pressure sensors with strain gauges mounted on spring elements; the high sensitivity to pressure that is constant in the wide pressure range; the improvement of sensors metrological characteristics owing to hysteresis absence. The possible application fields of developed sensors are measuring of high and extremely high pressure, chemical and oil industries, measuring of pressure in oil bore-holes, investigation of explosive processes.

Keywords: gallium antimonide, sensor, hydrostatic pressure.

REFERENCES

1. Druzhinin A. O., Mar'yamova I. I., Kutrakov O. P. *Datchiki mekhanichnikh velichin na osnovi nitkopodibnikh kristaliv kremniyu, germaniyu ta spoluk A^3B^5* [Sensors of mechanical quantities based on whiskers of silicon, germanium and compounds A^3B^5]. Lviv Polytechnic Publishing House, 2015, 232 p. (Ukr)

2. http://www.bdsensors.ua/products/product_info.php?id=39

3. Bernotas K. E., Gritsyus A. A., Zhilenis S. G., Petrovskii Ch. K. Semiconductor impulsive pressure sensor. *Combustion, Explosion, and Shock Waves*, 1986, vol. 22, iss. 2, pp. 256-258. DOI: 10.1007/BF00749276

4. Krivorotov N. P., Izaak T. I., Romas L. M., Svinolupov Yu. G., Stchogol S. S. Microelectronic pressure sensors. *Tomsk State University Journal*, 2005, no. 285, pp. 139-147. (Rus)

5. Shimkyavichus Ch. S. [Pressure transducers based on gallium-aluminum arsenide]. *Instruments and Systems: Monitoring, Control, and Diagnostics*, 2004, no. 2, pp. 35-37. (Rus)

6. Sagar A. Experimental investigation of conduction band of GaSb. *Physical Review*, 1960, vol. 117, pp. 93-100. DOI: 10.1103/PhysRev.117.93

7. Keyes R. W., Pollak M. Effect of hydrostatic pressure on the piezoresistance of i-InSb, p-InSb and n-GaSb. *Physical Review*, 1960, vol. 118, pp. 1001-1007. DOI: 10.1103/PhysRev.118.1001

8. Sagar A., Pollak M., Keyes R. W. Effects of high hydrostatic pressure on the electrical properties of n-type GaSb. *Bulletin of the American Physical Society*, 1960, vol. 5, no. 1, pp. 63.

9. Osadchii E. P. *Proektirovanie datchikov dlya izmereniya mekhanicheskikh velichin* [Design of sensors for measuring mechanical values]. Moscow, Mechanical Engineering, 1979, 480 p. (Rus)