

Д. т. н. А. А. ДРУЖИНИН, к. т. н. И. И. МАРЬЯМОВА,
А. П. КУТРАКОВ, к. т. н. И. В. ПАВЛОВСКИЙ

Украина, г. Львов, Национальный университет "Львовская политехника"
E-mail: druzh@polynet.lviv.ua

Дата поступления в редакцию
05.05 2008 г.

Оппонент д. ф.-м. н. И. Е. ПРОЦЕНКО
(Сумской гос. университет, г. Сумы)

ТЕНЗОРЕЗИСТОРЫ ДЛЯ НИЗКИХ ТЕМПЕРАТУР НА ОСНОВЕ НИТЕВИДНЫХ КРИСТАЛЛОВ КРЕМНИЯ

Исследованы тензометрические характеристики микрокристаллов кремния p -типа. Разработаны тензорезисторы для различных диапазонов низкой температуры, включая температуру жидкого гелия, а также для работы в сильных магнитных полях при 4,2 К.

Необходимость создания чувствительных миниатюрных тензорезисторов для измерения деформации при низких температурах обусловлена потребностями таких отраслей техники как авиакосмическая, машиностроительная, криоэнергетическая и др. Для измерения деформации при низких температурах (вплоть до температуры жидкого гелия) используются проволочные и фольговые тензорезисторы, изготовленные из различных металлических сплавов. Недостатком этих тензорезисторов является низкий коэффициент тензочувствительности, величина которого при 4,2 К составляет 1,8—2,2 [1]. Использование полупроводниковых материалов, в частности, кремния, для изготовления чувствительных элементов тензорезисторов позволило значительно увеличить их чувствительность [2]. Механизм действия таких тензорезисторов основан на классическом «смиттовском» тензорезистивном эффекте в полупроводниках [3]. Проведенные нами исследования тензорезистивного эффекта в легированных нитевидных кристаллах (НК) кремния p -типа в диапазоне температур 4,2—300 К показали, что при гелиевых температурах в кремнии с концентрацией бора вблизи перехода «металл—диэлектрик» (ПМД) наблюдается гигантский неклассический тензорезистивный эффект [4], вызванный изменением механизма переноса носителей тока при криогенных температурах. Это открывает возможности создания кремниевых тензорезисторов с высокой чувствительностью при низких температурах.

Нами разработаны полупроводниковые тензорезисторы, чувствительными элементами которых являются НК Si p -типа с ориентацией $\langle 111 \rangle$, поскольку они обладают уникальной механической прочностью и, благодаря своей морфологии, позволяют реализовать максимальный для данного материала тензорезистивный эффект [5]. Эти тензорезисторы нашли применение во многих областях науки и техники как для измерения прочностных характеристик различ-

ных изделий и конструкций, так и для создания на их основе датчиков механических величин (давления, ускорения и др.) [6].

Для создания кремниевых тензорезисторов, работоспособных при низких температурах, проводились исследования тензометрических характеристик НК Si p -типа, легированных бором, с различным удельным сопротивлением в широком диапазоне температур — от комнатной до температуры жидкого гелия.

Исследовались три группы кристаллов с разной степенью легирования:

1) сильнолегированные НК Si p -типа с удельным сопротивлением $\rho_{300\text{K}} = 5 \cdot 10^{-5}$ Ом·м с металлическим типом проводимости;

2) НК Si p -типа с $\rho_{300\text{K}} = 1 \cdot 10^{-4}$ Ом·м и концентрацией бора, соответствующей близости к переходу «металл—диэлектрик» с металлической стороны перехода;

3) НК Si p -типа с $\rho_{300\text{K}} = 1,3 \cdot 10^{-4}$ Ом·м и концентрацией бора вблизи ПМД с диэлектрической стороны.

Однако на характеристики кристаллов кремния, закрепленных на материалах с разным коэффициентом термического расширения (КТР), влияют так называемые термические деформации, обусловленные различием КТР кремния и исследуемого материала [4, 7]. Особенно сильно это влияние проявляется при низких температурах. Поэтому исследования тензометрических характеристик НК кремния для создания тензорезисторов на их основе проводились на двух группах материалов:

1) материалы с КТР, близким к КТР кремния, в частности, инварные сплавы;

2) материалы с КТР, который сильно отличается от КТР кремния, в частности, сталь.

Методика эксперимента

Исследование тензометрических характеристик НК кремния в диапазоне температур 4,2—300 К проводилось в гелиевом криостате с помощью специально разработанного устройства с упругим элементом в виде консольной балки, на которой крепились кристаллы, приклеенные лаком ВЛ-931 (с температурой полимеризации 180°C). Консольные балки, изготовленные из разных материалов (инвара или стали), с помощью специального механизма деформировались ступенчато в диапазоне деформаций сжатия-растяжения до $\pm 1,25 \cdot 10^{-3}$ отн. ед. Во время измерений элект-

ропитание кристаллов осуществлялось от источника постоянного тока Keithley 224. Электрическое напряжение на образцах и выходный сигнал сенсора температуры измерялись цифровыми вольтметрами типа Keithley 2000 с одновременной автоматической записью показаний приборов на компьютер.

Экспериментально определялись зависимости сопротивления НК Si от деформации балки ϵ_0 при фиксированных температурах: 300, 77 и 4,2 К. Полученные затем зависимости относительного изменения сопротивления кристаллов от ϵ_0 $\Delta R(\epsilon_0)/R_0=f(\epsilon_0)$ определяют тензометрические характеристики кристаллов при этих температурах. Значения коэффициента тензочувствительности при фиксированной температуре можно рассчитать по формуле

$$K = \frac{\Delta R(\epsilon_0)/R_0}{\epsilon_0}, \quad (1)$$

где R_0 — сопротивление кристалла на недеформированной балке; $\Delta R(\epsilon_0)$ — изменение сопротивления кристалла в результате деформации балки.

Тензометрические характеристики НК кремния на упругих элементах из инвара

На рис. 1, а приведены полученные экспериментально тензометрические характеристики для первой группы кристаллов, закрепленных на инварной балке, при указанных температурах. Как видно из графиков, эти кристаллы характеризуются наличием классического тензорезистивного эффекта (сопротивление кристаллов увеличивается при деформации растяжения и уменьшается при деформации сжатия) во всем исследуемом интервале температур. Величина коэффициента тензочувствительности этих кристаллов, рассчитанная по формуле (1), при разных

температурах составляет соответственно $K_{300K} \approx 96$, $K_{77K} \approx 224$ и $K_{4,2K} \approx 283$ при деформации растяжения балки $\epsilon = 1,08 \cdot 10^{-3}$. Такие НК Si можно использовать в качестве чувствительных элементов тензорезисторов, работоспособных в широком диапазоне температур — от комнатной до температуры жидкого гелия.

Тензометрические характеристики НК Si с концентрацией бора вблизи ПМД с металлической стороны перехода приведены на рис. 1, б. Как видно, при комнатной температуре и температуре жидкого азота их тензометрические характеристики имеют вид, типичный для классического тензорезистивного эффекта в кремнии. Величина коэффициента тензочувствительности таких кристаллов составляет $K_{300K} \approx 93$ и $K_{77K} \approx 261$ при деформации растяжения балки $\epsilon = 1,08 \cdot 10^{-3}$. При температуре жидкого гелия тензометрические характеристики этих кристаллов имеют необычный вид в результате проявления неклассического тензорезистивного эффекта: сопротивление кристаллов сильно возрастает под действием деформации и не зависит от ее знака; при этом коэффициент тензочувствительности увеличивается и достигает значения $K_{4,2K} \approx 606$ при деформации растяжения балки $\epsilon = 1,08 \cdot 10^{-3}$. Созданные на основе таких кристаллов тензорезисторы могут использоваться для измерения деформации при криогенных температурах вплоть до температуры жидкого гелия [8].

НК Si с концентрацией бора вблизи ПМД с диэлектрической стороны перехода (рис. 1, в), характеризуются чрезвычайно высокой тензочувствительностью при температуре жидкого гелия, что обусловлено неклассическим тензорезистивным эффектом в этих кристаллах: $K_{4,2K} = 4,9 \cdot 10^3$ при деформации рас-

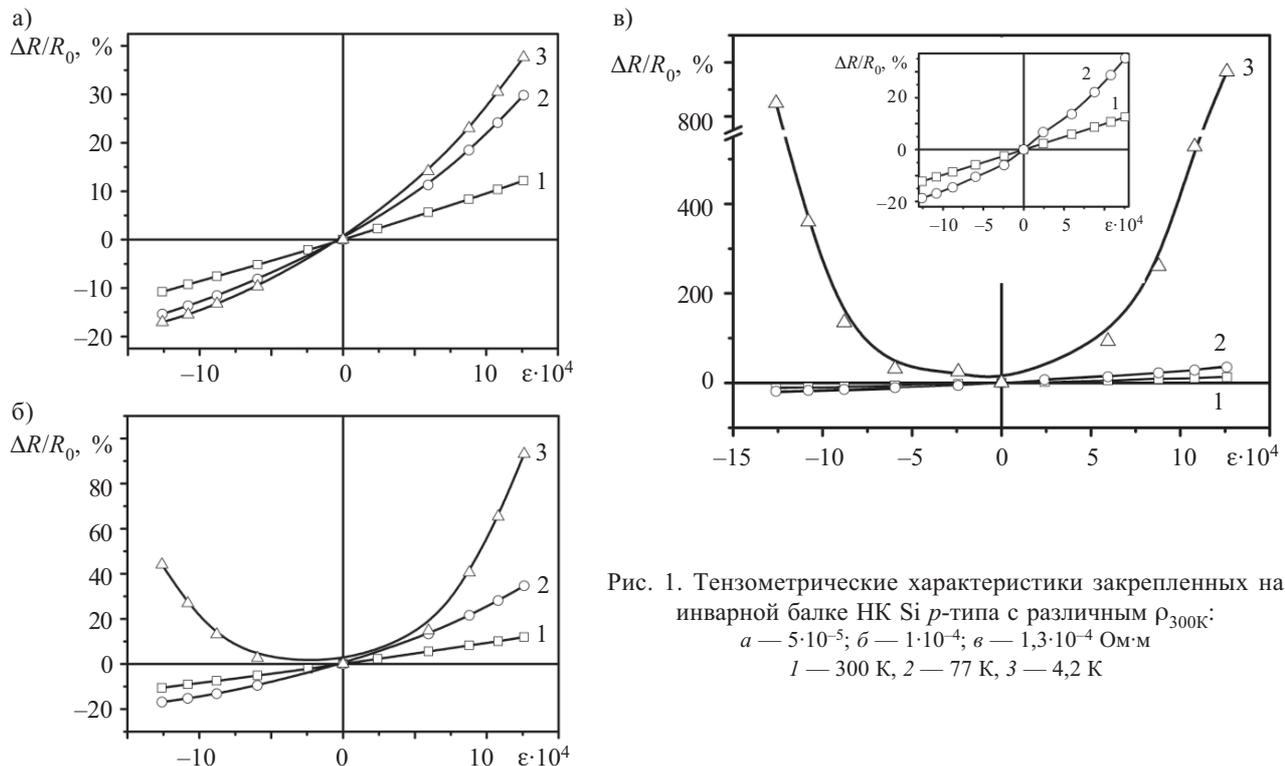


Рис. 1. Тензометрические характеристики закрепленных на инварной балке НК Si p-типа с различным ρ_{300K} :
 а — $5 \cdot 10^{-5}$; б — $1 \cdot 10^{-4}$; в — $1,3 \cdot 10^{-4}$ Ом·м
 1 — 300 К, 2 — 77 К, 3 — 4,2 К

тяжения балки $\epsilon=1,08 \cdot 10^{-3}$ и $K_{4,2K}^*=-3,3 \cdot 10^3$ при деформации сжатия $\epsilon=-1,08 \cdot 10^{-3}$, что на два порядка выше коэффициента тензочувствительности обычных кремниевых тензорезисторов при такой температуре. Это открывает возможности использования таких кристаллов как чувствительных элементов тензорезисторов для измерения очень малых деформаций при гелиевых температурах. Однако это не исключает возможности использования этих кристаллов в тензорезисторах для работы при температуре жидкого азота, для них $K_{77K}^*=266$ и $K_{300K}^*=99$ при уровне деформации $\epsilon=1,08 \cdot 10^{-3}$.

Тензометрические характеристики НК кремния на упругих элементах из стали

Следует отметить, что если КТР материала балки (сталь в нашем случае) больше КТР кремния, то на НК Si, закрепленный на балке, действует термическая деформация сжатия, значение которой возрастает при низких температурах. Рассчитанные из экспериментальных данных значения термической деформации для микрокристаллов Si, закрепленных на стальной балке, составляют: $\epsilon_T = -(4,5-5) \cdot 10^{-4}$ при 300 К, $\epsilon_T = -1,85 \cdot 10^{-3}$ при 77 К и $\epsilon_T = -2,3 \cdot 10^{-3}$ при 4,2 К. При сравнении значения термической деформации ϵ_T , которую испытывают при низких температурах кристаллы p-Si, закрепленные на стальной балке, с величиной деформации самой балки, которая достигает величины $\epsilon = \pm 1,25 \cdot 10^{-3}$, становится понятным, почему термическая деформация сильно влияет на тен-

зометрические характеристики этих кристаллов при криогенных температурах.

На рис. 2, а приведены тензометрические характеристики сильнолегированных НК кремния на стальной балке при разных температурах. Влияние термической деформации наиболее сильно проявляется при криогенных температурах в интервале 4,2—77 К, поэтому тензометрические характеристики этих кристаллов при 77 К и 4,2 К при деформации сжатия балки имеют значительную нелинейность (кривые 2, 3 на рис. 2, а). Такие НК Si p-типа, на наш взгляд, нецелесообразно использовать для тензорезисторов, предназначенных для измерения при криогенных температурах деформации конструкций и изделий, изготовленных из материалов, КТР которых значительно больше КТР кремния (например, стали).

Совсем другой вид имеют тензометрические характеристики НК Si p-типа с концентрацией бора вблизи ПМД при низких температурах, когда проявляется действие неклассического тензорезистивного эффекта в этих кристаллах. На рис. 2, б показаны тензометрические характеристики НК Si p-типа с $\rho_{300K} = 1 \cdot 10^{-4}$ Ом·м (вблизи ПМД с металлической стороны перехода) на стальной балке. Поскольку при гелиевых температурах эти НК находятся под действием деформации сжатия даже при деформации растяжения балки за счет действия термической деформации со стороны стальной балки, кривая 3 на рис. 2, б соответствует характеру изменения сопротивления НК Si под действием деформации сжатия для случая не-

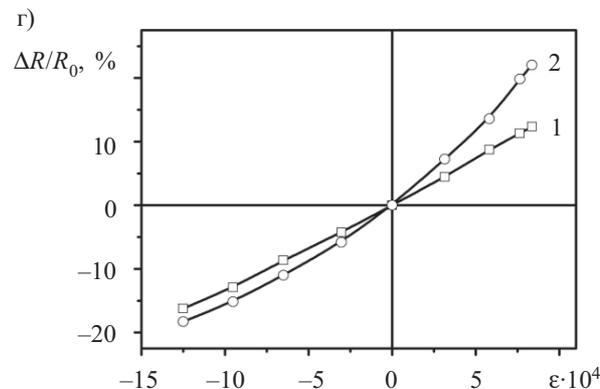
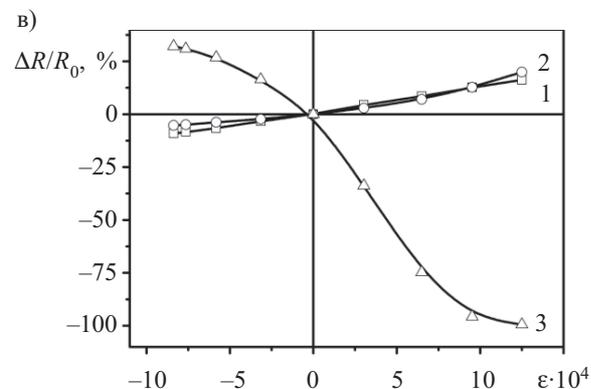
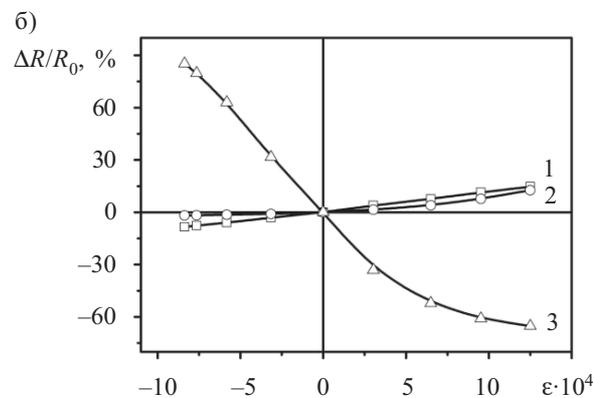
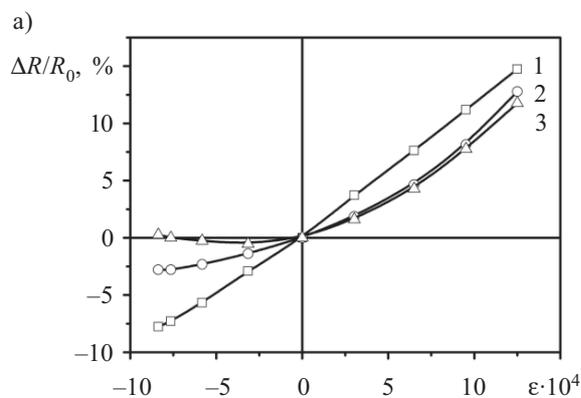


Рис. 2. Тензометрические характеристики закрепленных на стальной балке НК Si p-типа с различным ρ_{300K} :
 а — $5 \cdot 10^{-5}$; б — $1 \cdot 10^{-4}$; в — $1,3 \cdot 10^{-4}$; г — $2,5 \cdot 10^{-4}$ Ом·м
 1 — 300 К; 2 — 77 К; 3 — 4,2 К

классического тензорезистивного эффекта. При этом величина коэффициента тензочувствительности составляет: $K_{4,2K} = -1020$ при $\epsilon = -8,4 \cdot 10^{-4}$ и $K_{4,2K} = -640$ при $\epsilon = 9,5 \cdot 10^{-4}$, тогда как $K_{77K} = 81$ и $K_{300K} = 120$ при $\epsilon = 9,5 \cdot 10^{-4}$. Такие НК Si *p*-типа с $\rho_{300K} = 1 \cdot 10^{-4}$ Ом·м можно рекомендовать как чувствительные элементы тензорезисторов для измерения деформаций стальных конструкций при гелиевых температурах.

Аналогичный характер имеют тензометрические характеристики НК Si *p*-типа вблизи ПМД с диэлектрической стороны перехода, закрепленных на стальной балке (рис. 2, в). Они имеют коэффициент тензочувствительности $K_{4,2K} = -1000$ и $K_{77K} = 133$ при деформации балки $\epsilon = 9,5 \cdot 10^{-4}$. При 4,2 К эти кристаллы имеют асимметричные тензометрические характеристики при растяжении и сжатии, а по величине коэффициента тензочувствительности сравнимы с НК *p*-Si с $\rho_{300K} = 1 \cdot 10^{-4}$ Ом·м. Однако для измерения деформации стальных конструкций и изделий при гелиевых температурах предпочтительнее использовать тензорезисторы на основе НК *p*-Si с $\rho_{300K} = 1 \cdot 10^{-4}$ Ом·м, которые характеризуются высоким значением $K_{4,2K}$ и симметричными (по отношению к деформации) тензометрическими характеристиками.

НК Si с концентрацией бора, которая отвечает диэлектрической области, удаленной от ПМД ($\rho_{300K} = 2,5 \cdot 10^{-4}$ Ом·м), при температуре жидкого азота имеют тензометрические характеристики, типичные для классического тензорезистивного эффекта (кривая 2 на рис. 2, з). Их коэффициент тензочувствительности равен $K_{77K} = 263$, а $K_{300K} = 147,5$ при $\epsilon = 8,4 \cdot 10^{-4}$. При 4,2 К такие кристаллы после закрепления на стальной балке под действием большой термической деформации ϵ_t в результате неклассического тензорезистивного эффекта очень сильно изменяют свое сопротивление, значение которого достигает 10—30 МОм. Поэтому их нецелесообразно использовать для тензорезисторов, предназначенных для работы при гелиевых температурах, в то же время они могут успешно применяться для измерения деформации стальных конструкций при температуре жидкого азота.

Тензорезисторы для криогенных температур и сильных магнитных полей

Для разработки тензорезисторов, работоспособных при криогенных температурах в сильных магнитных полях, исследовалось влияние магнитного поля на сопротивление НК Si *p*-типа с разной концентрацией бора с целью выбора кристаллов, параметры которых наиболее стабильны при воздействии магнитного поля. Проводились измерения магнитосопротивления недеформированных и одноосно деформированных кристаллов при температуре жидкого гелия. Результаты измерений приведены на рис. 3. Как видно, минимальное изменение сопротивления в сильных магнитных полях имеют сильнолегированные НК Si *p*-типа с $\rho_{300K} = 5 \cdot 10^{-5}$ Ом·м, для которых относительное изменение сопротивления недеформированных кристаллов ($\epsilon = 0$) под воздействием магнитного поля с индукцией $B = 6$ Тл не превышает 1,8% (кривая 1 на рис. 3). В то же время для НК Si *p*-типа с

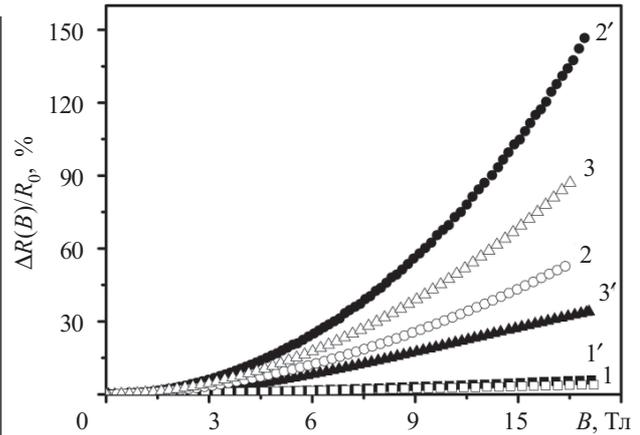


Рис. 3. Магнитосопротивление при 4,2 К недеформированных (1—3) и деформированных (1'—3') $\epsilon = -3,8 \cdot 10^{-3}$ НК Si *p*-типа с различным ρ_{300K} : 1, 1' — $5 \cdot 10^{-5}$ Ом·м; 2, 2' — $1 \cdot 10^{-4}$ Ом·м; 3, 3' — $1,3 \cdot 10^{-4}$ Ом·м

$\rho_{300K} = (1—1,3) \cdot 10^{-4}$ Ом·м изменение сопротивления составляет десятки процентов (кривые 2 и 3 на рис. 3). Действие одноосной деформации на сильнолегированные НК *p*-Si не приводит к существенному изменению их сопротивления (кривая 1' на рис. 3), тогда как для кристаллов с концентрацией бора вблизи ПМД изменение сопротивления в магнитном поле составляет десятки процентов (кривые 2', 3' на рис. 3).

Поэтому сильнолегированные НК *p*-Si могут использоваться как чувствительные элементы тензорезисторов для работы при температуре жидкого гелия в сильных магнитных полях [9]. Характеристика такого тензорезистора иллюстрируется кривой 3 на рис. 1, а. Коэффициент тензочувствительности таких тензорезисторов $K_{4,2K} = 276$ при деформации растяжения $\epsilon = +1,26 \cdot 10^{-3}$ и $K_{4,2K} = 116$ при деформации сжатия $\epsilon = -1,26 \cdot 10^{-3}$, что в несколько десятков раз превышает значение коэффициента тензочувствительности проволочных и фольговых тензорезисторов [1], предназначенных для работы в таких же условиях.

Разработаны низкотемпературные тензорезисторы на основе нитевидных кристаллов кремния *p*-типа, легированных бором. Для измерения деформации в материалах с КТР, близким к КТР кремния, разработаны тензорезисторы для широкого диапазона температур 4,2—300 К; для криогенных температур, включая температуру жидкого гелия; для температуры жидкого азота.

Для измерения деформации в материалах с КТР, большим КТР кремния (сталь и сплавы), разработаны тензорезисторы для гелиевых температур; для температуры жидкого азота.

Разработаны тензорезисторы, работоспособные при гелиевых температурах в сильных магнитных полях (с индукцией до 6 Тл), на основе сильнолегированных НК *p*-Si.

Таким образом, использование микрокристаллов кремния *p*-типа с концентрацией бора вблизи перехода «металл—диэлектрик», обладающих неклассическим тензорезистивным эффектом при 4,2 К, в каче-

стве чувствительных элементов тензорезисторов, позволило создать тензорезисторы для гелиевых температур с аномально высоким коэффициентом тензочувствительности.

ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ

1. Клокова Н. П. Тензорезисторы // Датчики и системы.— 2004.— № 3.— С. 10—12.
2. Эрлер В., Вальтер Л. Электрические измерения неэлектрических величин полупроводниковыми тензорезисторами.— М.: Мир, 1974.
3. Бир Г. Л., Пикус Г. Е. Симметрия и деформационные эффекты в полупроводниках.— М.: Наука, 1972.
4. Druzhinin A. A., Maryamova I. I., Pavlovsky I. V., Palewski T. Piezoresistive properties of boron-doped silicon whiskers at cryogenic temperatures // Functional Materials.— 2004.— Vol. 11, N. 2.— P. 268—272.
5. Voronin V., Maryamova I., Zaganyach Y. et al. Silicon whiskers for mechanical sensors // Sensors and Actuators.— 1992.— Vol. A30, N. 1–2.— P. 27—33.
6. Дружинин А. А., Марьямова И. И., Лавитская Е. Н. и др. От полупроводниковых тензорезисторов к микроэлектронным датчикам // Датчики и системы.— 2001.— № 6.— С. 2—7.
7. Новикова С. И. Тепловое расширение твердых тел.— М.: Наука, 1974.
8. Пат. 5217 України. Чутливий елемент сенсора механічних величин для температури рідкого гелію / А. О. Дружинін, І. Й. Мар'ямова, О. П. Кутраков, І. В. Павловський.— 2005.— Бюл. № 2.
9. Пат. 11353 України. Чутливий елемент сенсора механічних величин для роботи при температурі рідкого гелію в сильних магнітних полях / А. О. Дружинін, І. Й. Мар'ямова, І. В. Павловський.— 2005.— Бюл. № 12.