

УДК 621.315.592

Д. т. н. А. А. ДРУЖИНИН, д. т. н. И. П. ОСТРОВСКИЙ, к. т. н. Ю. Н. ХОВЕРКО,
С. И. НИЧКАЛО, Р. Н. КОРЕЦКИЙ

Украина, г. Львов, Национальный университет „Львовская политехника“;

Польша, г. Вроцлав, Международная лаборатория сильных магнитных полей и низких температур

E-mail: druzh@polynet.lviv.ua

НАНОКРИСТАЛЛЫ $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$ В РОЛИ ЧУВСТВИТЕЛЬНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ СЕНСОРА МАГНИТНОГО ПОЛЯ И ТЕМПЕРАТУРЫ

Исследовано влияние магнитного поля на электрофизические свойства нитевидных нанокристаллов (НК) $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$ при низких температурах. Показано, что полевая зависимость сопротивления образцов, легированных до концентрации носителей, соответствующей диэлектрической стороне перехода «металл—диэлектрик», имеет линейный характер. Предложена концепция создания сенсоров на базе НК $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$ для одновременного измерения индукции магнитного поля и температуры.

Ключевые слова: нитевидные нанокристаллы, магнетосопротивление, сенсор.

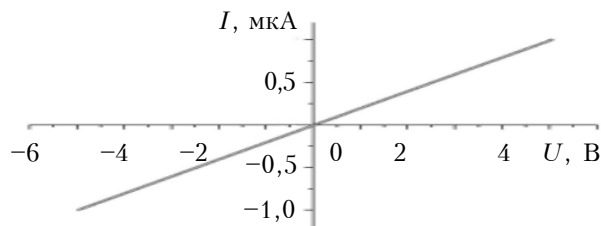
Нитевидные кристаллы (НК) $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$ благодаря своей миниатюрности, высокой механической прочности, совершенству кристаллической структуры представляют собой перспективный материал для создания чувствительных элементов сенсоров физических величин (температуры, давления, магнитного поля и т. д.) [1, 2]. В частности, известно, что НК твердых растворов $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$ при низких температурах обладают значительным магнетосопротивлением [3–5], что позволяет использовать их в качестве чувствительных элементов сенсоров магнитного поля.

В основе работы сенсоров физических величин на основе НК лежит температурная зависимость электропроводности НК и ее изменение под влиянием внешних факторов, например магнитного поля, давления, деформации и др. В настоящее время существует достаточное количество методов изучения механизмов проводимости кристаллов, однако одним из наиболее эффективных является анализ характера их магнетосопротивления в широком температурном интервале 4,2–300 К. Теоретические и экспериментальные работы по изучению характера магнетосопротивления НК твердого раствора $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$ с концентрацией носителей, соответствующей диэлектрической стороне перехода «металл—диэлектрик» (ПМД), проводились авторами [1, 6, 7] для толстых кристаллов диаметром порядка 20–50 мкм. Однако механизмы переноса носителей заряда в наноразмерных НК твердого раствора $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$ мало исследованы в широком интервале температур, в частности, из-за сложности создания омических контактов. Так, например, метод импульсного приваривания, который подходит для микрокристаллов, непригоден для создания контактов к наноразмерным НК из-за напряжений или деформации кристаллов, которые возникают в результате того,

что геометрические размеры приконтактных областей не соответствуют самим образцам. Кроме того, в связи с непрерывным увеличением количества научных работ по получению наноматериалов исследование электрофизических свойств нитевидных нанокристаллов и их практическое применение в сенсорной электронике несомненно является актуальной задачей [1, 2].

Целью настоящей работы было исследование электрофизических свойств наноразмерных НК твердого раствора $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$ в интервале температур 4,2–300 К и в магнитных полях до 14 Тл для оценки возможности использования их в качестве чувствительных элементов сенсоров одновременного измерения индукции магнитного поля и температуры.

Объектами исследований были НК твердого раствора $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$, выращенные методом химических газотранспортных реакций в ампуле [8, 9] и легированные бором до концентрации вблизи ПМД. Диаметр образцов составлял 200 нм, удельное сопротивление $\rho_{300\text{К}} = 1,07$ Ом·см. Для контроля морфологии и элементного состава НК $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$ использовали электронный сканирующий микроскоп JEOL JSM-6490LV, проводили микрозондовый анализ (AN 10000) и ионную масс-спектроскопию (CAMECA IMS 4F). Результаты микрозондового анализа показали, что содержание германия в твердом растворе $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$ не превышает 3%. Электрические контакты к нанокристаллам твердого раствора $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$ создавались с помощью металлического клея на основе композита галлия с индием [10], особенностью которого является высокая электропроводность даже при криогенных температурах [11]. Полученные в интервале температур от 4,2 до 300 К вольт-амперные характеристики всех образцов НК твердого раствора $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$ имеют линейный характер, что свидетельствует об омичности контактов. На **рис. 1** для примера приведена ВАХ при $T = 4,2$ К.

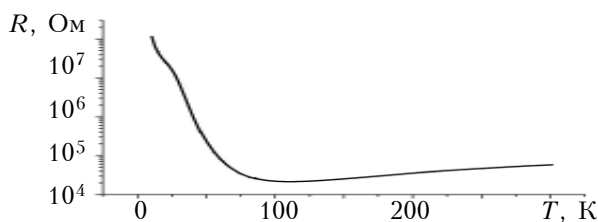
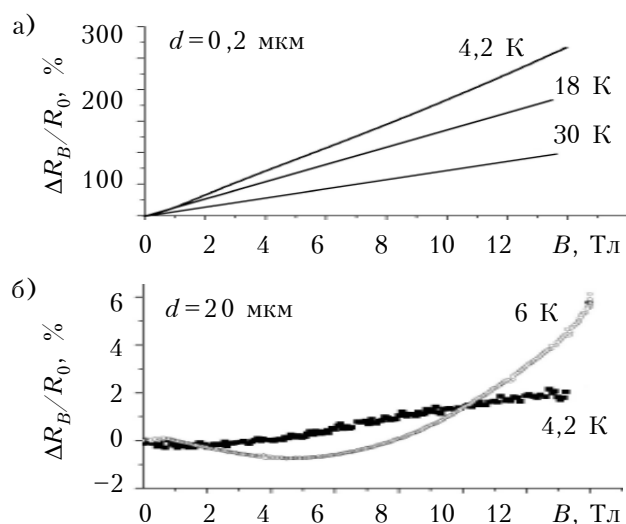

 Рис. 1. ВАХ образцов НК $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$

Представленные на **рис. 2** результаты исследований показали, что с повышением температуры сопротивление исследуемых образцов НК резко уменьшается в интервале 4,2–77 К. Исследования магнетосопротивления образцов показали его существенную зависимость от магнитного поля. Так, при индукции магнитного поля 14 Тл и температуре 4,2 К поперечное магнетосопротивление образца $\Delta R_B/R_0=250\%$ (**рис. 3, а**), в то время как продольное практически не изменяется. Следует отметить, что магнетосопротивление сильнолегированных кристаллов Si и $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$ в области ПМД имеет знакопеременный характер в зависимости от степени легирования [12], т. е. для них могут наблюдаться максимумы либо минимумы магнетосопротивления [1].

Для сравнения были исследованы образцы диаметром 20 мкм ($\rho_{300\text{K}}=0,02 \text{ Ом}\cdot\text{см}$) при гелиевых температурах и индукции магнитного поля до 14 Тл. На графике **рис. 3, б** видно, что для этих образцов наблюдается отрицательное магнетосопротивление, значение которого может составить $-1\ldots-2\%$.

Обнаруженное различие магнетосопротивления образцов разного диаметра можно объяснить различной степенью их легирования в процессе роста: кристаллы большего диаметра растут с более высокой скоростью и захватывают большее количество примеси, чем кристаллы меньшего диаметра.

Поскольку тонкие кристаллы, с одной стороны, имеют линейную температурную зависимость сопротивления в интервале 4,2–77 К, а с другой — высокое значение магнетосопротивления, целесообразно использовать их в качестве чувствительных элементов сенсоров для одновременного измерения индукции магнитного поля и температуры. Разработанный на основе таких НК сенсор состоит из двух одинаковых чувствительных элементов, размещенных перпендикулярно друг другу. Один чувствительный элемент измеряет температуру и не реагирует на магнит-


 Рис. 2. Температурная зависимость сопротивления образцов НК $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$

 Рис. 3. Магнетосопротивление образцов НК $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$ разного диаметра при различной температуре

ное поле, поскольку его продольное магнетосопротивление практически равно нулю, а второй чувствителен и к температуре, и к полю. Градуировочные характеристики терморезистивной и магнитной составляющих чувствительности элементов такого сенсора показаны на **рис. 4**.

Поскольку предложенное конструктивное решение сенсора предполагает температурную коррекцию выходного сигнала, была разработана системная плата и программное обеспечение для ее работы на основе микроконтроллеров Atmega 88/168. Микроконтроллер хранит во flash-памяти поправочные коэффициенты и производит первичную обработку выходного сигнала сенсора. Этот модуль имеет также дополнительные аналоговые входы меньшей разрядности (10 бит) для контроля состояния системы, например напряжения питания.

Температурная коррекция выходных сигналов сенсора осуществляется следующим образом: микроконтроллер, получив значение выходного напряжения чувствительного элемента, выбирает из памяти программ значение относительного

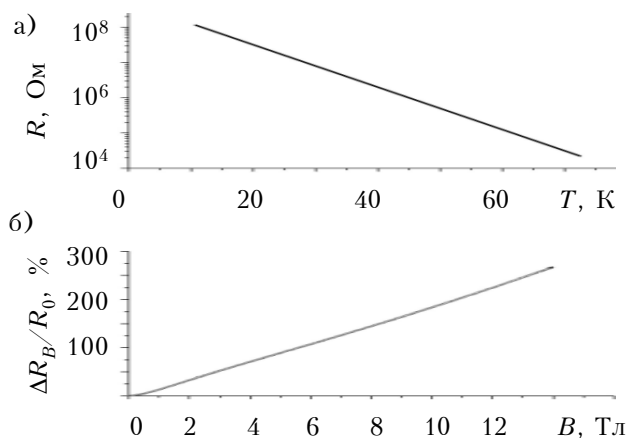


Рис. 4. Градуировочные характеристики терморезистивной (а) и магнитной (б) чувствительности элементов сенсора магнитного поля и температуры

изменения сопротивления для исследуемого диапазона температуры и вычисляет значение индукции магнитного поля. Чувствительность сенсора к магнитному полю составляет 20% от 1 Тл при 4,2 К, что позволяет измерять магнитное поле с точностью 5 мТл. В настоящее время для измерения слабых магнитных полей используются датчики Холла или серийные магниторезисторы (например, типа СМ4-1 [13]), а для сильных магнитных полей и низких температур могут найти широкое применение предложенные сенсоры.

Проведенные исследования показали, что легированные нитевидные нанокристаллы твердого раствора $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$ диаметром 200 нм можно использовать в качестве чувствительных элементов сенсоров для одновременного измерения индукции магнитного поля и низкой температуры. Более толстые НК для этой цели непригодны, так как при низких температурах имеют отрицательное магнетосопротивление.

ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ

1. Дружинин А. О., Островский И. П., Когут Ю. Р. Ниткоподобні кристали кремнію, германію та їх твердих розчинів в сенсорній електроніці. — Львів: Вид. НУ "Львівська політехніка", 2010. [Druzhinin A. O., Ostrovskii I. P., Kogut Yu. R. L'viv: Vid. NU "L'viv's'ka politekhnika", 2010]
2. Лепіх Я. І., Гордієнко Ю. О., Дзядевич С. В. та ін. Інтелектуальні вимірювальні системи на основі мікроелектронних датчиків нового покоління. — Одеса: Астропринт, 2011. [Lepikh YA. I., Gordienko Yu. O., Dzyadevich S. V. та ін. Odesa: Astroprint, 2011]
3. Дружинин А. О., Островский И. П., Когут Ю. Р. Фізичні основи створення сенсорів низьких температур на базі ниткоподібних кристалів Si-Ge // Сенсорна електроніка та мікросистемні технології. — 2007. — № 1. — С. 8–13. [Druzhinin A. O., Ostrovskii I. P., Kogut Yu. R. // Sensorna elektronika ta mikrosistemni tekhnologiyi. 2007. N 1. P. 8]
4. Druzhinin A. A., Ostrovskii I. P., Kogut Iu. R., Warchulska J. K. Magnetoresistance and magnetic susceptibility of doped Si-Ge whiskers // Functional Materials. — 2007. — Vol. 14 (1). — P. 480–484.
5. Druzhinin A., Ostrovskii I., Liakh N. Magnetoresistance of Ge-Si whiskers // Physics of Solid State. — 2003. — Vol. 4 (1). — P. 485–490.
6. Shahovtsova S. I., Shahovtsov V. I., Belokurova I. N. The mobility of carriers and the magnetoresistance of Ge-Si alloys // Sol. St. Com. — 1982. — Vol. 44 (8). — P. 1169–1174.
7. Дружинин А. О., Островский И. П., Когут Ю. Р., Нічкало С. І. Магнетопір ниткуватих кристалів Si-Ge з концентрацією домішки в околі концентраційного переходу метал-діелектрик за криогенних температур // Вісник НУ "Львівська політехніка": Електроніка. — 2008. — № 619. — С. 127–134. [Druzhinin A. O., Ostrovskii I. P., Kogut Yu. R., Nichkalo S. I. // Visnik NU "L'viv's'ka politekhnika": Elektronika. 2008. N 619. P. 127]
8. Гиваргизов Е. И. Рост нитевидных и пластинчатых кристаллов из пара. — Москва: Наука, 1977. [Givargizov E. I. Rost nitevidnykh i plastinchatykh kristallov iz para. Moskva: Nauka, 1977]
9. Druzhinin A., Ostrovskii I. Investigation of Si-Ge whiskers growth by CVD // Phys. Stat. Sol. (C). — 2004. — Vol. 1 (2). — P. 333–336.
10. Базарова Ф. Ф., Колесова Л. С. Клеи в производстве радиоэлектронной аппаратуры. — Москва: Энергия, 1975. [Bazarova F. F., Kolesova L. S. Klei v proizvodstve radioelektronnoi apparatury. Moskva: Energiya, 1975]
11. Druzhinin A. O., Khoverko Yu. M., Ostrovskii I. P. et al. Investigation of Ga-In contacts to Si and Ge wires for sensor application // Materials of XIII International conference "Physics and Technology of Thin Films and Nanosystems". — Ukraine, Ivano-Frankivsk. — 2011. — Vol. 1. — P. 234.
12. Баранський П. І., Федосов А. В., Гайдар Г. П. Фізичні властивості кристалів кремнію та германію в полях ефективного зовнішнього впливу. — Луцьк: Надстир'я, 2000. [Baranskii P. I., Fedosov A. V., Gaidar G. P. Fizichni vlastivosti kristaliv kremniyu ta germaniyu v polyakh effektivnogo zovnishn'ogo vplivu. Luts'k: Nadstir'ya, 2000]
13. Видулина Л. Ф., Глауберман М. А. Фізика сенсорів температури і магнітного поля. — Одеса: Маяк, 2000. [Vikulina L. F., Glauberman M. A. Fizika sensorov temperatury i magnitnogo polya. Odesa: Mayak, 2000]

Дата поступления рукописи
в редакцию 24.05 2012 г.

Druzhinin A. A., Ostrovskii I. P., Khoverko Yu. M., Nichkalo S. I., Koretskii R. M. **$\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$ nanocrystals as sensitive elements for magnetic field and temperature sensors.**

Key words: nanowhiskers, magnetoresistance, sensor.

The paper deals with investigation of magnetic field effect on electrophysical properties of $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$ nanowhiskers at low temperatures. It was shown that field dependence of resistance of $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$ nanowhiskers samples doped to concentrations near the dielectric side of metal-insulator junction possesses the linear character. The concept of making sensors on the basis of $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$ nanowhiskers detecting simultaneously magnetic field and temperature has been proposed.

Ukraine, Lviv, Lviv Polytechnic National University, Poland, Wroclaw, International Laboratory of High Magnetic Fields and Low Temperatures

Дружинин А. О., Островский И. П., Ховерко Ю. М., Нічкало С. І., Корецький Р. М. **Нанокристали $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$ як чутливі елементи сенсора магнітного поля та температури.**

Ключові слова: ниткоподібні нанокристали, магнетопір, сенсор.

Представлено результати досліджень електрофізичних властивостей ниткоподібних нанокристалів (НК) $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$ під дією магнітного поля за низьких температур. Польова залежність опору зразків, легованих до концентрації носіїв, яка відповідає діелектричному боку переходу «метал—діелектрик», має лінійний характер. Запропоновано концепцію створення сенсорів на базі НК $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$ для одночасного вимірювання індукції магнітного поля і температури.

Україна, НУ "Львівська політехніка"; Польща, м. Вроцлав, Міжнародна лабораторія сильних магнітних полів і низьких температур.