

УДК 621.315.592

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

Украина, Национальный университет «Львовская политехника»

E-mail: druzh@polynet.lviv.ua

СИСТЕМА ИЗМЕРЕНИЯ МАГНИТНОГО ПОЛЯ И ТЕМПЕРАТУРЫ С ЦИФРОВОЙ ОБРАБОТКОЙ СИГНАЛА

Разработана система измерения индукции магнитного поля и температуры с использованием нитевидных кристаллов кремния p -типа проводимости в качестве первичных преобразователей. Система позволяет в интервале 4,2–77 К производить измерения и магнитного поля, и температуры, а в интервале 100–300 К измерять температуру при воздействии магнитных полей. Такая система пригодна для преобразования малых сигналов, для чего используется усилитель с программируемым коэффициентом усиления и аналого-цифровой преобразователь с высокой разрешающей способностью.

Ключевые слова: нитевидные кристаллы, кремний, датчик, температура, давление.

В настоящее время существует большое количество измерительных систем на основе датчиков физических величин, в том числе multifunctionальных, т. е. датчиков, которые одновременно измеряют два и более параметров, например сенсор деформации и температуры, температуры и магнитного поля и др. [1–4]. Однако такие системы имеют ряд существенных недостатков, среди которых следует отметить высокую стоимость как отдельных составляющих частей, так и системы в целом; большое количество функциональных блоков, что затрудняет эксплуатацию измерительной системы; недостаточную стабильность и воспроизводимость характеристик. Следовательно, важной задачей является разработка и создание новых систем, которые были бы лишены указанных недостатков. В [4] нами были рассмотрены физические основы создания датчика магнитного поля и температуры на базе нитевидных кристаллов Si–Ge, работоспособного в ограниченном интервале температур 4,2–77 К. Настоящая работа посвящена дальнейшему развитию концепции создания multifunctionальных датчиков физических величин, работоспособных в широком интервале температур 4,2–300 К, а также разработке системы измерения индукции магнитного поля и температуры с использованием нитевидных кристаллов Si p -типа проводимости в качестве первичных преобразователей.

Среди основных требований, предъявляемых к современным сенсорным приборам, можно отметить multifunctionальность, высокую точность преобразования, термостабильность, простоту использования, минимальное энергопотребление при возможности функционирования с низковольтными источниками питания, возмож-

ность объединения в сеть и т. д. Обычно первичные преобразователи генерируют очень слабые сигналы, которые должны обрабатываться оптимизированными интерфейсными схемами для обеспечения адекватного усиления без внесения шумов, ухудшающих точность измерений. Зачастую датчики размещаются вдали от схем цифровой обработки, при этом разработчик сталкивается с требованиями обеспечения защиты от электромагнитных помех, гальванической изоляции и малого потребления энергии. Кроме требований к тракту прохождения сигнала иногда предъявляют также жесткие требования к питанию, коммуникационным интерфейсам (между приборами и системами) и к защите информации при передаче данных. Обеспечение необходимых требований определяется структурными и схемотехническими решениями, развитие которых сегодня актуально [5–7].

Разработанная измерительная система, блок-схема которой представлена на **рис. 1**, состоит из первичного преобразователя (чувствительного элемента-сенсора) и схемы предварительной обработки сигнала и передачи данных.

Исследования электрофизических свойств нитевидных кристаллов кремния p -типа проводимости, используемых в качестве первичных преобразователей измерительной системы, показали, что в интервале 4,2–300 К температурная зависимость сопротивления линейна в двух диапазонах — от 4,2 до 80 К и от 100 до 300 К (**рис. 2**). Поэтому такие образцы можно использовать для достаточно широкого рабочего диапазона температур. Температурный коэффициент сопротивления (**ТКС**) таких образцов в интервале 4,2–80 К составляет $135\% \cdot K^{-1}$, а в интервале 100–300 К — около $0,4\% \cdot K^{-1}$. В свою оче-

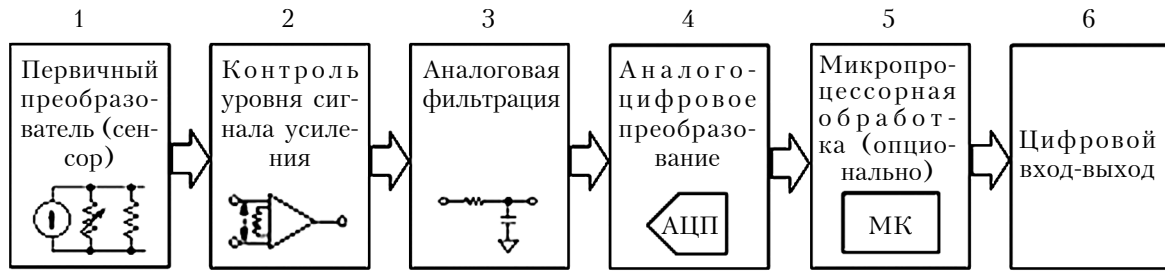


Рис 1. Блок-схема измерительной системы:

1 — преобразователь/мост; 2 — аналоговый интерфейс; 3 — блок фильтрации; 4 — блок АЦП; 5 — блок цифровой обработки; 6 — блок коммутации

редь, полевая зависимость сопротивления (магнетосопротивление) также линейна для магнитных полей до 14 Тл (рис. 3). Это позволило создать многофункциональный сенсор магнитного поля и температуры с последующей интеграцией в автоматизированную измерительную систему.

Конструктивно первичный преобразователь такого многофункционального сенсора состоит из двух одинаковых чувствительных элементов, расположенных перпендикулярно друг другу. Первый чувствительный элемент измеряет только температуру и нечувствителен к магнитному полю, поскольку его продольное магнетосопротивление практически равно нулю, а второй — чувствителен и к температуре, и к магнитному полю. Чувствительность такого датчика к магнитному полю составляет 0,1–0,2 Тл⁻¹ при температуре 4,2 К.

Таким образом, терморезисторы на основе сильно легированных НК *p*-Si могут использоваться в широком диапазоне температур 4,2–300 К, однако их чувствительность значительно меньше, чем в кристаллах с более низким уровнем легирования.

В этом диапазоне температурные зависимости сопротивления НК *p*-Si описываются следующими уравнениями:

— в интервале 4,2–80 К

$$R(T) = A_1 - B_1 T - C_1 T^2 + D_1 T^3, \quad (1)$$

— в интервале 100–300 К

$$R(T) = A_2 - B_2 T + C_2 T^2 - D_2 T^3, \quad (2)$$

где $A_1 = 8,29137$ Ом; $B_1 = 0,01695$ Ом·К⁻¹;

$$C_1 = 0,00154 \text{ Ом} \cdot \text{К}^{-2}; D_1 = 1,46073 \cdot 10^{-5} \text{ Ом} \cdot \text{К}^{-3};$$

$$A_2 = 32895,79405 \text{ Ом} \cdot \text{К}; B_2 = 337,99842 \text{ Ом} \cdot \text{К}^{-1};$$

$$C_2 = 2,44916 \text{ Ом} \cdot \text{К}^{-2}; D_2 = 0,00351 \text{ Ом} \cdot \text{К}^{-3}.$$

Следует отметить, что в системе должно быть предусмотрено измерение достаточно малых величин. Как видно из рис. 2, при увеличении температуры сопротивление образцов падает, а следовательно, уменьшается и магнетосопротивление, что подтверждается рис. 3.

Анализ исходных характеристик предлагаемого сенсора показал, что в исследуемом температурном интервале необходимо производить температурную коррекцию выходного сигнала датчика, используя схемотехнические решения, и таким образом повышать надежность и стабильность функционирования системы.

Рабочий диапазон измерений можно расширить, используя компенсационные методы обработки выходных сигналов за счет введения программных алгоритмов аппроксимации.

Уменьшить погрешность измерения индукции магнитного поля можно, проводя температурную коррекцию сигналов путем введения поправочных алгоритмов.

Система построена по принципу «входной сигнал — обработка — выходной сигнал» (Input — Process — Output (IPO) Model), который сейчас широко используется в различных измерительных системах. Это позволяет повысить качественные показатели подобных систем в целом и добиться гибкости функционирования и легкости обращения с системой конечного потребителя.

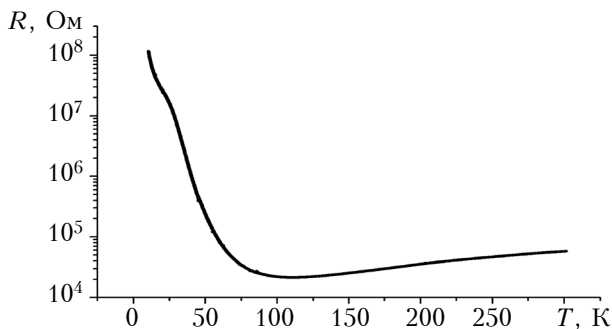


Рис. 2. Температурная зависимость сопротивления образцов НК Si

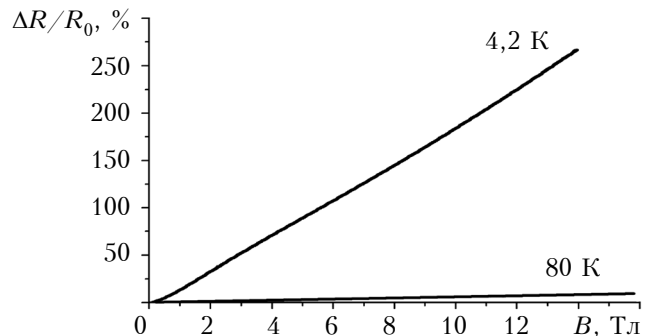


Рис. 3. Магнетосопротивление образцов НК Si при фиксированных температурах

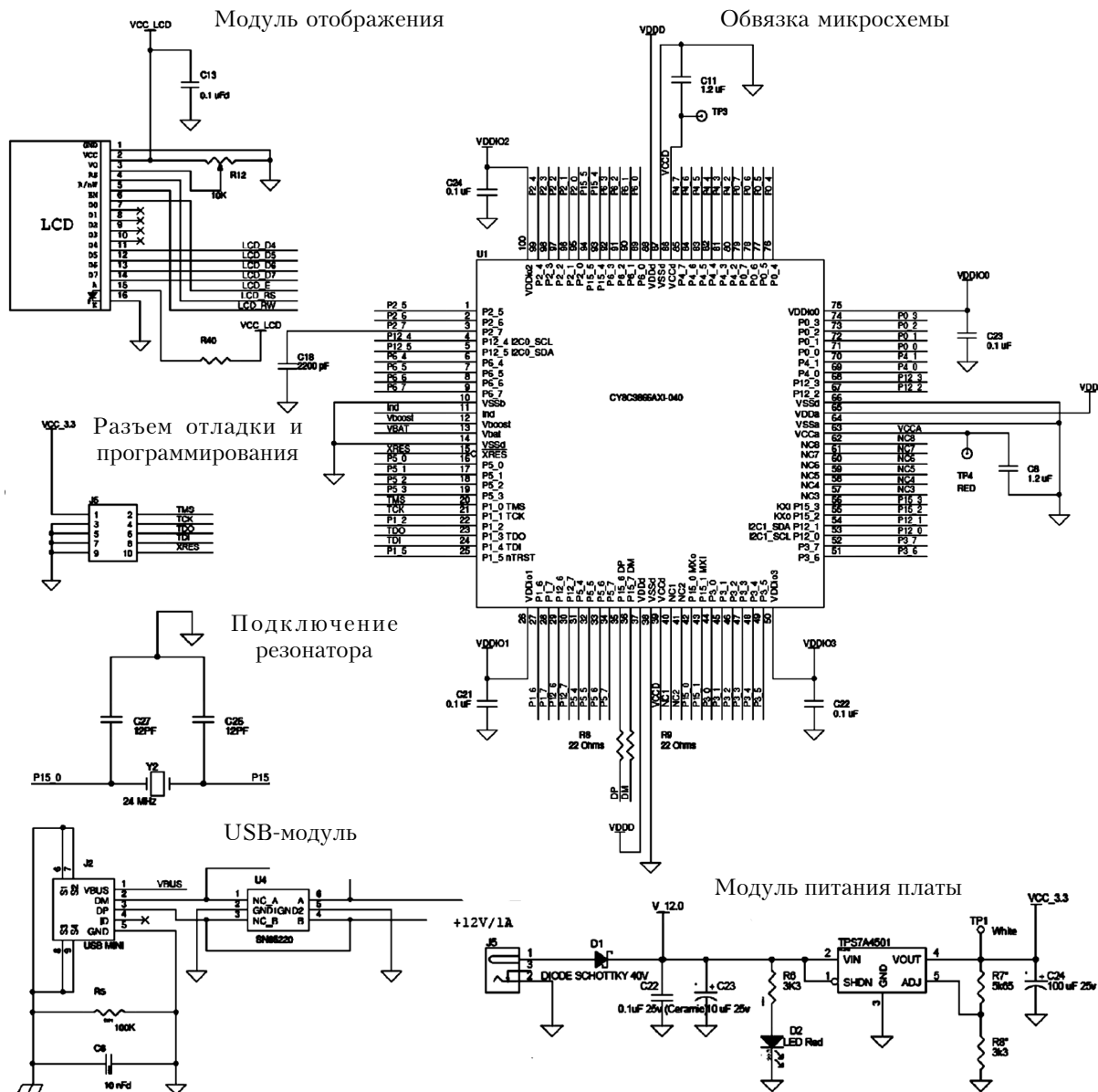


Рис. 4. Электрическая схема измерительной системы

В данном измерительном устройстве использовано основное преимущество цифровой техники в процессе обработки данных — это сравнительно простая реализация операций высокого уровня, которые сложно осуществить аналоговыми устройствами. К таким операциям относятся подавление шумов, усиление, цифровая фильтрация и нелинейная обработка сигнала. При этом функциональная нагрузка на чувствительный элемент датчика уменьшается и снижаются требования к характеристикам элемента. Кроме того, благодаря цифровой обработке становится возможным измерение достаточно малых величин. Разработанная нами измерительная система позволяет измерять индукцию магнитного поля и температуру с точностью 3 мТл и $\pm 0,1$ К соответственно.

В качестве схемы обработки использована программируемая система на кристалле PSoC3 (Programmable System-on-Chip) корпорации

Супресс. Выбор данного микроконтроллера в качестве базового элемента системы был обусловлен, прежде всего, наличием, кроме микропроцессорного ядра, массива интегрированной аналоговой и цифровой периферии, сконфигурированной для работы со смешанными сигналами. Микроконтроллер выполнен в виде матрицы программируемых универсальных цифровых блоков (**рис. 4**). В частности, согласно приведенной на рис. 1 блок-схеме, на рис. 4 отображены структурные элементы 4, 5 и 6. Интеграция всей системы на одном кристалле позволяет снизить потребление энергии за счет уменьшения питающих напряжений и токов. Это важно для приборов, требующих низкого энергопотребления, а также для миниатюризации устройств с питанием от автономных источников энергии, что позволяет повысить надежность схемы по сравнению с набором отдельных блоков на микросхемах с той же функциональностью. Меньшее ко-

личество составляющих упростило также компоновку и монтаж готового изделия.

Для коммутации сенсора с основной измерительной платой использована плата усиления и фильтрации, выполненная отдельно на дискретных компонентах. Конфигурация микропроцессора производилась путем использования специализированного программного обеспечения, что позволяло быстро составлять систему из необходимых функциональных блоков, например дельта-сигма-АЦП. Алгоритм обработки и коррекции базируется на использовании поправочных коэффициентов с учетом разных диапазонов измерения. В настоящей статье программный код не приведен из-за большого объема и специфики задачи.

Таким образом, разработанные авторами сенсоров на основе нитевидных кристаллов p -Si позволили создать систему для измерения индукции магнитного поля и температуры в диапазонах 4,2–77 и 100–300 К. Температурная коррекция выходных сигналов в такой системе обеспечивается вторичным преобразователем, осуществляющим программную обработку цифровых сигналов. Система пригодна для преобразования малых сигналов, для чего используется усилитель с программируемым коэффициентом усиления и аналого-цифровой преобразователь с высокой разрешающей способностью.

В системе учтены основные особенности сопряжения сенсоров на основе нитевидных кристаллов кремния p -типа с микроконтроллерами. Установлено, что использование программируемых систем на кристалле для обработки информации в сенсорных устройствах является перспективным. В разработанной системе обработки информации разрешающая способность сенсоров на базе нитевидных кристаллов по магнитному полю достигла 3 мТл, а рассеиваемая мощность системы уменьшилась за счет использования специализированной ИС.

ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ

1. Лепіх Я. І., Гордієнко Ю. О., Дзядевич С. В. та ін. Створення мікроелектронних датчиків нового покоління для інтелектуальних систем. — Одеса: Астропринт, 2010. [Lepikh Ya. I., Gordiyenko Yu. O., Dzyadevich S. V. ta in. Stvorenniya mikroelektronnikh datchikiv novogo pokolinniya dlya intelektual'nikh sistem. — Odessa: Astroprint, 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., Gordiyenko Yu. O., Dzyadevich S. V. ta in. Intelektual'ni vimiryuvальni sistemi na osnovi mikroelektronnikh datchikiv novogo pokolinniya. — Odessa: Astroprint, 2011]
3. Викулина Л. Ф., Глауберман М. А. Физика сенсоров температуры и магнитного поля. — Одесса: Маяк, 2000. [Vikulina L. F., Glauberman M. A. Fizika sensorov temperatury i magnitnogo polya. — Odessa: Mayak, 2000]
4. Дружинин А. А., Островский И. П., Ховерко Ю. Н. и др. Нанокристаллы $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$ в роли чувствительных элементов сенсора магнитного поля и температуры // Технология и конструирование в электронной аппаратуре. — 2012. — № 5. — С. 19–21. [Druzhinin A. A., Ostrovskii I. P.,

Khoverko Yu. N. i dr. // Tekhnologiya i konstruirovaniye v elektronnoy apparature. 2012. N 5. P. 19]

5. Дружинін А. О., Островський І. П., Когут Ю. Р. Ниткоподібні 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. Nitkopodibni kristali kremniyu, germaniyu ta yikh tverdikh rozchiniv v sensornii elektronitsi. — L'viv: Vid. NU «L'viv's'ka politekhnikha», 2010]

6. Druzhinin A. A., Khoverko Yu. N., Ostrovskiy I. P. et al. Remote control measuring system based on strain sensors // Computational Problems of Electrical Engineering. — 2012. — Vol. 2, N 1. — P. 11–14.

7. Дружинін А. О., Мар'ямова І. Й., Кутраков О. П., Лях-Кагуй Н. С. Тензорезистивні сенсори тиску на основі ниткоподібних кристалів кремнію // Сенсорна електроніка та мікросистемні технології. — 2012. — Т. 3, № 9 (3). — С. 16–24. [Druzhinin A. O., Mar'yamova I. I., Kutrakov O. P., Lyakh-Kagui N. S. // Sensorna elektronika ta mikrosistemni tekhnologiyi. — 2012. — Vol. 3, N 9 (3). — P. 16]

Дата поступления рукописи
в редакцию 27.05 2013 г.

Druzhinin A. A., Ostrovskiy I. P., Khoverko Yu. N., Nichkalo S. I., Berezhanskyi E. I. **Measuring system for magnetic field and temperature with digital signal processing.**

Keywords: whiskers, silicon, sensor, temperature, pressure.

The measuring system for the magnetic field and temperature using silicon whiskers p -type conductivity as a primary device has been developed. The developed system allows the measurement of the magnetic field and temperature in the temperature range 4,2–77 K, as well as to measure the temperature under the influence of magnetic fields in the range of 100–300 K. It is shown that this system is suitable for the conversion of small signals using a programmable gain amplifier and analog-to-digital converter with high resolution.

Ukraine, Lviv Polytechnic National University.

Дружинін А. О., Островський І. П., Ховерко Ю. М., Нічкало С. І., Бережанський Є. І. **Система вимірювання магнітного поля і температури з цифровою обробкою сигналу.**

Ключові слова: ниткоподібні кристали, кремній, датчик, температура, тиск.

Розроблено систему вимірювання індукції магнітного поля і температури з використанням ниткоподібних кристалів кремнію p -типу провідності як первинних перетворювачів. Система дозволяє в інтервалі 4,2–77 К проводити вимірювання і магнітного поля, і температури, а в інтервалі 100–300 К вимірювати температуру при впливі магнітних полів. Така система придатна для перетворення малих сигналів, для чого використовується підсилювач з програмованим коефіцієнтом посилення і аналого-цифровий перетворювач з високою роздільною здатністю.

Україна, Національний університет «Львівська політехніка».