

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

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

ЭЛЕМЕНТЫ ТВЕРДОТЕЛЬНОЙ ЭЛЕКТРОНИКИ НА ОСНОВЕ КНИ-СТРУКТУР И НИТЕВИДНЫХ КРИСТАЛЛОВ Si ДЛЯ КРИОГЕННЫХ ТЕМПЕРАТУР

Представлены результаты исследования электрофизических свойств поликристаллических пленок кремния в структурах «кремний-на-изоляторе» и нитевидных кристаллов кремния в температурном диапазоне 4,2–70 К, полученные с помощью импедансных измерений в интервале частот от 10 Гц до 250 кГц. Показана возможность их использования в качестве элементов твердотельной электроники, работоспособных при криогенных температурах.

Ключевые слова: поликремний, нитевидный кристалл, КНИ-структура, диаграмма Найквиста.

В настоящее время в аэрокосмической технике, криоэлектронике и др. широко применяются высокочувствительные, быстродействующие устройства и компоненты твердотельной электроники (резонаторы, фильтры, линии задержки и др.), работоспособные в сложных условиях эксплуатации [1, 2]. Однако необходимость работы в условиях глубокого охлаждения и связанные с этим технические трудности их реализации резко ограничивают использование таких устройств. Перспективной элементной базой для таких приборов являются, в первую очередь, структуры «кремний-на-изоляторе» (КНИ), использование которых может обеспечить серийноспособную технологию изготовления микроэлектронных схем различного назначения [3]. С другой стороны, известно, что использование полупроводниковых нитевидных кристаллов (НК) при разработке ряда устройств позволяет расширить область их применения и на криоэлектронику [4, 5]. Для решения указанной проблемы создания компонентов электронных схем твердотельной электроники необходимо проведение физических исследований и высокий уровень технологического создания их элементной базы.

Одним из известных методов исследования структуры материала является метод импедансной спектроскопии [6], использование которого в ряде случаев позволяет разделить и определить вклады различных элементов микроструктуры в полную проводимость образца. С помощью данного метода можно получить дополнительную информацию об электрофизических свойствах материала, качественно и количественно оценить, какой вклад в его проводимость вносят размеры структуры, поверхности и межзеренных границ.

Целью настоящей работы является исследование электрофизических свойств поликристаллических пленок кремния в КНИ-структурах и нитевидных кристаллов Si при температурах от 4,2 до 70 К в частотном диапазоне 10 Гц – 250 кГц на предмет возможности их использования при создании устройств, которые могут работать в условиях криогенных температур.

Образцы для исследований и методика эксперимента

Объектом исследований служили тестовые элементы *p*-типа проводимости, легированные бором с концентрацией носителей заряда $2,4 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$ и микрокристаллы кремния с удельным сопротивлением $\rho_{300\text{K}} = 0,02 \text{ Ом} \cdot \text{см}$. Поликремниевые резисторы в КНИ-структуре имели размеры $80 \times 8 \times 0,5 \text{ мкм}$. Известно, что в микроэлектронике широко используются слои поликристаллического кремния на поверхности окисленной кремниевой пластины. Такие слои формируются, как правило, химическим осаждением из газовой фазы методом LPCVD [7].

Нитевидные кристаллы Si выращивали методом химических транспортных реакций в закрытой бромидной системе с использованием примесей бора и золота. Температура зоны источника составляла 1370 К, температура зоны кристаллизации – от 1070 до 1150 К. Диаметр НК составлял 1–40 мкм. Исследовались кристаллы с концентрацией акцепторной примеси на диэлектрической стороне перехода «металл – диэлектрик» $N_a < 5 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$ [5].

Согласно результатам Холловских измерений концентрация носителей заряда составляла $2,4 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$ в образцах поликремния и $5 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$ в нитевидных кристаллах. Электрические контакты создавались методом

импульсного сваривания по методике, обеспечивающей необходимую омичность контактов и описанной в [5]. Омичность полученных контактов была подтверждена линейностью вольт-амперных характеристик образцов, полученных в интервале температур 4,2–300 К.

В исследованиях использовался метод импедансной спектроскопии, при котором образец возбуждается малым синусоидальным сигналом. На основе полученных экспериментально частотных зависимостей Z'' и Z' (реактивная и активная составляющие сопротивления соответственно) предложены эквивалентные электрические схемы для анализа структуры образцов. Графическим отображением экспериментальных данных была зависимость $Z''(Z')$ или, другими словами, годограф импеданса (диаграмма Найквиста).

Экспериментальные результаты

Экспериментальные результаты исследования низкотемпературной проводимости поликристаллических пленок в КНИ-структурах и нитевидных кристаллов кремния позволили обнаружить ряд особенностей.

На рис. 1 представлена диаграмма Найквиста для мелкозернистых образцов с концентрацией носителей заряда $2,4 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$. Поликристаллический материал состоит из отдельных монокристаллов или зерен, которые представляют собой разупорядоченные области толщиной порядка нескольких атомных слоев и которые соединены между собой так называемыми границами зерен. Наличие этих границ приводит к качественному различию между электрическими свойствами поли- и монокристаллического материалов, которым нельзя пренебрегать. Известно, например, что в отличие от монокристаллического кремния, в поликри-

сталлических слоях подвижность электронов и дырок, а также время их жизни, малы. Это обусловлено наличием большого количества дефектов структуры, локализованных на межзеренных границах, которые являются центрами рассеяния и рекомбинации.

Анализ диаграмм Найквиста для мелкозернистых образцов указывает на емкостной характер их сопротивления [8]. Годограф импедансных зависимостей занимает отрицательную ветвь полуокружности [9, 10], что определяется наличием емкостей, которые обусловлены аккумуляцией заряда на дефектах межзеренных границ в поликремнии. Эти результаты согласуются с нашими предыдущими исследованиями, в которых было обнаружено проявление Моттовской проводимости ($\ln\rho \sim T^{-1/4}$) в низкотемпературной области [11]. Например, для мелкозернистых слоев поликремния с концентрацией носителей заряда $2,4 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$ наблюдалась характерная температурная зависимость, что с физической точки зрения можно объяснить наличием в образцах большого количества межзеренных границ.

Эквивалентная схема проводимости рассматриваемой структуры должна включать параллельное соединение конденсатора и резистора (рис. 1, вставка), в которой емкость замещает межзеренные границы, а сопротивление — объем зерна. Эти результаты хорошо анализировать на примере рассчитанных температурных зависимостей емкости. Как видно на рис. 2, в мелкозернистом образце емкость мала и возрастает вместе с температурой в интервале 4,2–300 К от 10 до 70 пФ, причем ее нарастание почти до 60 пФ происходит быстро — в интервале от 4,2 до 60 К с постепенным насыщением при дальнейшем нагревании. Мелкозернистые образцы содержат зерна малых размеров (порядка 30 нм), суммарное расстояние между которыми достаточно велико. Как следствие, межзеренная (барьерная) емкость относительно мала.

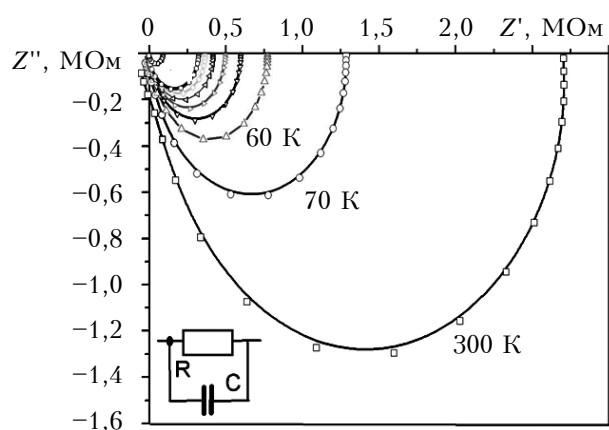


Рис. 1. Диаграмма Найквиста для нерекристаллизованных образцов поликремния в КНИ-структурах с концентрацией $2,4 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$ при различных значениях температуры — 300, 70, 60 К и ниже с шагом 10 К вплоть до 4, 2 К (на вставке — эквивалентная схема проводимости такой структуры)

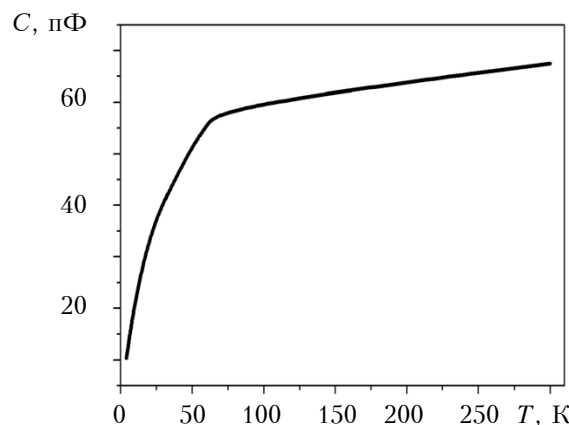


Рис. 2. Температурная зависимость емкости мелкозернистых образцов

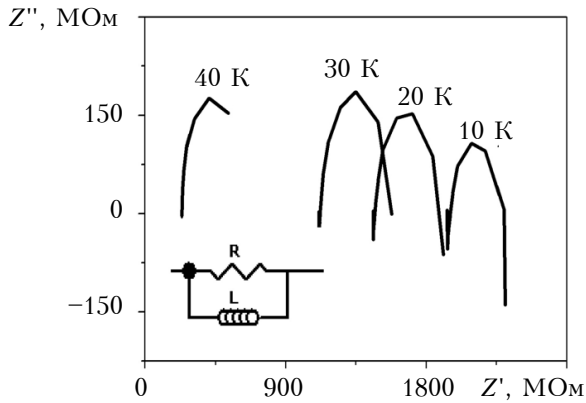


Рис. 3. Диаграмма Найквиста для нитевидных кристаллов Si ($\rho_{300\text{K}} = 0,02 \text{ Ом}\cdot\text{см}$, $d = 30 \text{ мкм}$) при различных значениях температуры

Что касается полупроводниковых индуктивных элементов на основе нитевидных кристаллов Si *p*-типа проводимости, то они могут быть использованы в планарной технологии изготовления полупроводниковых аналогов катушек индуктивности в качестве элементов микросхем, которые изготавливаются в одном технологическом процессе. Представленные на рис. 3 диаграммы Найквиста для образцов с $\rho_{300\text{K}} = 0,02 \text{ Ом}\cdot\text{см}$ указывают на индуктивный характер сопротивления в интервале температур 10–40 К (т. е. проявляется так называемый характер «отрицательной» емкости, что наблюдалось ранее при исследованиях [9, 10]). Это объясняется, вероятно, проявлением поверхностной проводимости при протекании переменного тока через нитевидный кристалл, вследствие чего наблюдается отставание тока относительно напряжения [12]. Следует отметить, что для таких образцов реактивная составляющая сопротивления имеет индуктивный характер и достигает наибольшего значения при 30 К. С повышением температуры такой характер Z'' проявляется в меньшей степени. Диапазон изменения индуктивности находится в пределах от 0,7 до 1,2 мГн.

Таким образом, полученные нами импедансные характеристики образцов позволяют прогнозировать возможность создания реактивных элементов твердотельной электроники определенных номиналов, работоспособных при низких температурах, на основе как поликристаллического, так и монокристаллического кремния.

Используя же комбинированный подход, можно реализовать на базе рассмотренных кремниевых элементов систему в виде колебательного контура (рис. 4, а). Для оценки параметров такой системы были выполнены расчеты на основе полученных экспериментальных данных.

Частота колебательного контура определяется следующим уравнением:

$$\omega = \sqrt{\omega_0^2 - \beta^2} = \sqrt{\frac{1}{LC} - \frac{R^2}{4L^2}},$$

где ω_0 – частота собственных колебаний;
 β – коэффициент затухания.

Комбинация элементов НК Si с легирующей примесью на диэлектрической стороне перехода «металл – диэлектрик», обеспечивающих индуктивность колебательного контура, с поликристаллическим кремнием в КНИ-структурах, который служит емкостным элементом такой системы, позволяет получить частотную зависимость выходного сигнала, которая показана на рис. 4, б. Резонансная частота колебательного контура равна 6,0 МГц; рассчитанная величина добротности данного контура составляет $Q=57,7$, что сопоставимо с добротностью известных LC-контуров.

Следует отметить, что характеристики разработанной системы зависят как от структуры образцов, так и от уровня их легирования, что позволяет изменять необходимые параметры элементов твердотельной электроники и систем на их основе в широких пределах.

Выводы

Результаты исследований электрофизических свойств поликристаллических пленок

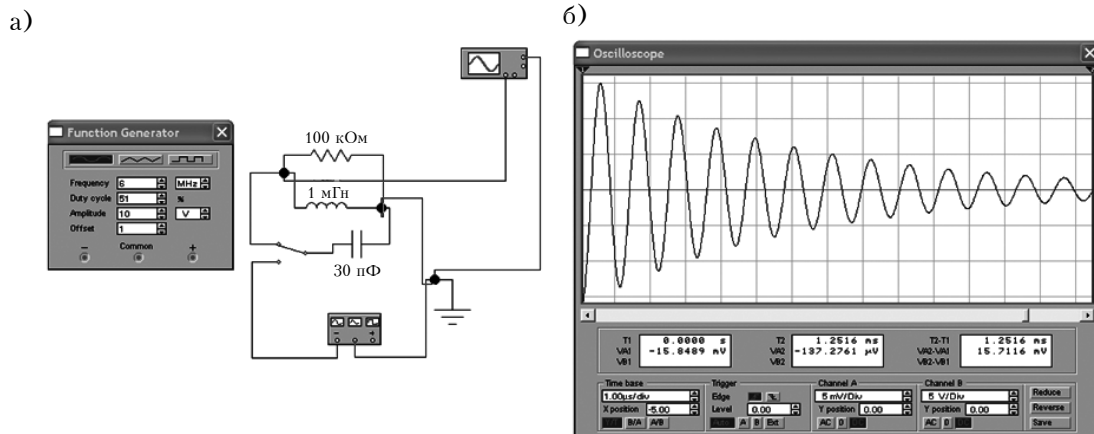


Рис. 4. Электрическая схема LC-контура (а) и его выходная характеристика (б) (слева от схемы – диалоговое окно изменения параметров задающего генератора)

кремния в КНИ-структурах и нитевидных кристаллов Si при температурах от 4,2 до 70 К в частотном диапазоне 10 Гц — 250 кГц указывают на перспективность их использования в качестве микроэлектронных компонентов интегральных схем — как дискретных, например емкостей или индуктивностей, так и комбинированных, в частности колебательных контуров, работоспособных в условиях криогенных температур.

ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ

1. Claeys C., Simon E. Perspectives of silicon-on-insulator technologies for cryogenic electronics // In book: Perspectives, science and technologies for novel silicon on insulator devices. — Dordrecht: Kluwer Academic Publ., 2000. — Vol. 73. — P. 233–247.
2. Kamins T. Polycrystalline Silicon for Integrated Circuits and Displays. — Dordrecht: Kluwer Academic Publ., 1998.
3. Druzhinin A., Maryamova I., Kogut I. et al. Polysilicon-in-insulator layers at cryogenic temperatures and high magnetic fields // In book: Science and technology of semiconductor-on-insulator structures and devices operating in a harsh environment. — Kluwer Academic Publ., Dordrecht. — Vol. 185. — 2005. — P. 297–302.
4. Druzhinin A.A., Ostrovskii I.P., Khoverko Yu.M. et al. Strain effect on magnetoresistance of SiGe solid solution whiskers at low temperatures // Materials Science in Semiconductor Processing. — 2011. — Vol. 14, N 1. — P. 18–22. DOI: 10.1016/j.mssp.2010.12.012
5. Дружинін А.О., Островський І.П., Когут Ю.Р. Ниткоподібні кристали кремнію, германію та їх твер-

дих розчинів у сенсорній електроніці. — Львів: Вид-во Львівської політехніки, 2010.

6. Григорчак І. І., Понеділок Г. В. Імпедансна спектроскопія. — Львів: Вид-во Львівської політехніки, 2011.
7. Дружинін А. О., Когут І. Т., Ховерко Ю. М. Структури кремній-на-ізоляторі для сенсорної електроніки. — Львів: Вид-во Львівської політехніки, 2013.
8. Druzhinin A., Ostrovskii I., Khoverko Yu. et al. Impedance spectroscopy of polysilicon in SOI structures // Physica Status Solidi (C). Vol. 11, N 1. — 2014. — P. 156–159.
9. Mora-Sero I., Bisquert J., Fabregat-Santiago F. et al. Implications of the negative capacitance observed at forward bias in nanocomposite and polycrystalline solar cells // Nano Letters. — 2006. — Vol. 6, iss. 4. — P. 640–650. DOI: 10.1021/nl052295q
10. Impedance spectroscopy: theory, experiment and applications / Ed. by E. Barsoukov, J.R. Macdonald. — New Jersey: Wiley-Interscience, 2005.
11. Druzhinin A., Khoverko Yu., Kogut I., Koretskii R. Properties of low-dimensional polysilicon in SOI structures for low temperature sensors // Advanced Materials Research. — 2014. — Vol. 854. — P. 49–55. DOI: 10.4028/www.scientific.net/AMR.854.49
12. Druzhinin A., Ostrovskii I., Khoverko Yu. et al. Variable-range hopping conductance in Si whiskers // Phys. Status Solidi (A). — 2014. — Vol. 211, iss. 2. — P. 504–508. DOI: 10.1002/pssa.201300162

*Дата поступления рукописи
в редакцию 11.06 2013 г.*

А. О. ДРУЖИНИН, І. П. ОСТРОВСЬКИЙ, Ю. М. ХОВЕРКО, Р. М. КОРЕЦЬКИЙ

Україна, Національний університет «Львівська політехніка»

E-mail: druzh@polynet.lviv.ua

ЭЛЕМЕНТЫ ТВЕРДОТЁЛЬНОЙ ЭЛЕКТРОНИКИ НА ОСНОВЕ КНИ-СТРУКТУР ТА НИТКОПОДІБНИХ КРИСТАЛІВ Si ДЛЯ КРІОГЕННИХ ТЕМПЕРАТУР

Представлено результати дослідження електрофізичних властивостей полікристалічних плівок кремнію в структурах «кремній-на-ізоляторі» та ниткоподібних кристалів Si в температурному діапазоні 4,2–70 К, отримані за допомогою імпедансних вимірювань в діапазоні частот від 10 Гц до 250 кГц. Показано можливість їх використання як елементів твердотільної електроніки, працездатних при криогенних температурах. Отримані імпедансні характеристики зразків вказують на можливість створення реактивних елементів твердотільної електроніки певних номіналів, придатних для роботи в умовах низьких температур, на основі полікристалічного і монокристалічного кремнію. На основі встановлених залежностей запропоновано окремі елементи твердотільної електроніки у вигляді ємнісних і індуктивних елементів та комплексну систему у вигляді коливального контуру, які працездатні при криогенних температурах. Характеристики розробленої системи залежать як від структури зразків, так і від рівня їх легування, що дозволяє змінювати при необхідності параметри елементів в широких межах.

Ключові слова: полікремній, ниткоподібний кристал, КНИ-структура, діаграма Найквіста.

DOI: 10.15222/TKEA2014.2.46
UDC 625.315.592

A. A. DRUZHININ, I. P. OSROVSKII,
Yu. M. KHOVERKO, R. N. KORETSKYI

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

ELEMENTS OF SOLID STATE ELECTRONICS BASED ON SOI-STRUCTURES AND SI WHISKERS FOR CRYOGENIC TEMPERATURES

The paper presents the study results of electrical properties of polycrystalline silicon films in silicon-on-insulator structures and Si whiskers in the temperature range of 4.2–70 K obtained by impedance measurements in the frequency range from 10 Hz to 250 kHz and the possibility of their use in solid-state electronics, functioning at cryogenic temperatures. Characteristics of samples obtained with impedance measurements allow to predict certain specifications of reactive elements of solid state electronics based on polycrystalline and single crystalline silicon, operable at low temperatures. Using the established dependencies, separate elements in the form of solid-state electronics capacitive and inductive elements as well as a combined system in an oscillatory circuit, operable at cryogenic temperatures, have been suggested. The features of developed system depend on the structure of samples and their doping level, which allows to change the required parameters of the elements of solid state electronics in a wide range.

Keywords: polysilicon, whisker, SOI-structure, Nyquist diagram.

REFERENCES

1. Claeys C., Simon E. *Perspectives of silicon-on-insulator technologies for cryogenic electronics. In book: Perspectives, science and technologies for novel silicon on insulator devices* (Ed. by P.L.F. Hemment, V.S.Lysenko, A.N.Nazarov), Dordrecht, Kluwer Academic Publ., 2000, vol. 73, pp.233-247.
2. Kamins T. *Polycrystalline silicon for integrated circuits and displays*. Dordrecht, Kluwer Academic Publ., 1998, p. 378.
3. Druzhinin A., Maryamova I., Kogut I., Pankov Yu., Khoverko Yu., Palewski T. *Polysilicon-in-insulator layers at cryogenic temperatures and high magnetic fields. In book: Science and technology of semiconductor-on-insulator structures and devices operating in a harsh environment* (Ed. by D.Flandre, A.N. Nazarov, P.L.F.Hemment), Kluwer Acad. Publishers, Dordrecht, vol. 185, 2005, pp. 297-302.
4. Druzhinin A.A., Ostrovskii I.P., Khoverko Yu.M., Liakh-Kaguj N.S., Kogut Iu.R. Strain effect on magnetoresistance of SiGe solid solution whiskers at low temperatures. *Materials science in semiconductor processing*, 2011, vol. 14, no 1, pp. 18-22. DOI: 10.1016/j.mssp.2010.12.012
5. Druzhinin A.A., Ostrovskii I.P., Kogut Iu.R. [*Whiskers of silicon, germanium, and their solid solutions in the sensor electronics*]. Publishing House of Lviv Polytechnic National University, 2010, 200 p. (in Ukrainian)
6. Grigorchak I.I., Ponedilok G.V. [*Impedance spectroscopy*]. Publishing House of Lviv Polytechnic National University, 2011, 352 p. (in Ukrainian)
7. Druzhinin A.A., Kogut Iu.R., Khoverko Yu.M. [*Structure of silicon-on-insulator electronics for the sensor*]. Publishing House of Lviv Polytechnic National University, 2013, 236 p. (in Ukrainian)
8. Druzhinin A., Ostrovskii I., Khoverko Yu., Nichkalo S., Kogut Iu. Impedance spectroscopy of polysilicon in SOI structures. *Physica Status Solidi (C)*, 2014, vol. 11, no 1, pp. 156-159.
9. Mora-Sero I., Bisquert J., Fabregat-Santiago F. et al. Implications of the negative capacitance observed at forward bias in nanocomposite and polycrystalline solar cells. *Nano Letters*, 2006, vol. 6, iss. 4, pp. 640-650. DOI: 10.1021/nl052295q
10. *Impedance spectroscopy: theory, experiment and applications* (Ed. by E.Barsoukov, J.R. Macdonald). New Jersey, Wiley-Interscience, 2005, 606 p.
11. Druzhinin A., Khoverko Yu., Kogut I., Koretskii R. Properties of low-dimensional polysilicon in SOI structures for low temperature sensors. *Advanced Materials Research*, 2014, vol. 854, pp. 49-55. DOI: 10.4028/www.scientific.net/AMR.854.49
12. Druzhinin A., Ostrovskii I., Khoverko Yu., Nichkalo S., Koretskyy R., Kogut Iu. Variable-range hopping conductance in Si whiskers. *Phys. Status Solidi (A)*, 2014, vol. 211, iss. 2, pp. 504-508. DOI: 10.1002/pssa.201300162