

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

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

ИССЛЕДОВАНИЕ ЧАСТОТНОЙ ЗАВИСИМОСТИ ПРОВОДИМОСТИ НИТЕВИДНЫХ КРИСТАЛЛОВ КРЕМНИЯ ПРИ КРИОГЕННЫХ ТЕМПЕРАТУРАХ ДЛЯ СОЗДАНИЯ СЕНСОРОВ ТЕМПЕРАТУРЫ НА ИХ ОСНОВЕ

Исследована частотная зависимость активного сопротивления нитевидных кристаллов кремния, легированных бором в разной концентрации, соответствующей диэлектрической стороне перехода «металл — диэлектрик», в температурном интервале 4,2–100 К. На основе анализа полученных характеристик установлены и изучены особенности механизма переноса носителей заряда в нитевидных кристаллах Si в области низких частот. Разработан тензорезистор, работоспособный при криогенных температурах и обеспечивающий точность измерения температуры до 0,1 К.

Ключевые слова: микрокристалл, частота, проводимость, сенсор, криогенная температура.

Как известно, измерение частотной зависимости импеданса является одним из важных методов получения информации о механизмах проводимости в полупроводниковых материалах [1–4], особенно в области низких температур [5, 6]. С понижением температуры ионизационные процессы в полупроводниках становятся невозможными, носители заряда в зоне проводимости вымораживаются, концентрация их становится настолько малой, что доминирующий вклад в электрический ток начинают вносить прыжки электронов непосредственно по примесям, что происходит за счет малого, но конечного перекрытия волновых функций соседних примесей [7, 8]. Характерной особенностью транспорта носителей заряда для локализованных примесных уровней является увеличение проводимости с ростом частоты, которое в большинстве случаев описывается степенной зависимостью в широком диапазоне частот. Для многих неупорядоченных материалов (аморфные и легированные полупроводники, полупроводниковые стекла, проводящие полимеры, гранулированные проводники и т. п.) частотная зависимость действительной части проводимости имеет степенной характер с показателем степени s [7], а для полупроводников s зависит от частоты: как правило, в низкочастотной области $0 < s < 1$, в области высоких частот $s > 1$ [9–11]. Для объяснения такого поведения частотной зависимости проводимости полупроводников требуется информация о конкретных особенностях механизма переноса в неупорядоченных материалах.

Целью настоящей работы было исследование частотных зависимостей активного сопротивления нитевидных кристаллов кремния с концентрацией легирующей примеси, соответствующей диэлектрической стороне фазового перехода

«металл — диэлектрик», изучение особенностей механизмов переноса в кристаллах, а также создание сенсора температуры на их основе.

Методика эксперимента

Нитевидные кристаллы (НК) кремния выращивались методом химических транспортных реакций в закрытой бромидной системе с использованием бора как легирующей примеси и золота как инициатора роста. Концентрация примесей в кристаллах изменялась в диапазоне $(2–5) \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$, что соответствует сериям образцов с удельным сопротивлением $\rho_{300\text{K}} = 0,0168–0,0143 \text{ Ом} \cdot \text{см}$ и относится к диэлектрической стороне перехода «металл — диэлектрик», где температурная зависимость сопротивления носит полупроводниковый характер. Контакты к кристаллам были созданы методом дуговой сварки платиновой микропроволоки диаметром $15 \cdot 10^{-6} \text{ м}$. Частотные зависимости активного сопротивления НК Si измерялись с помощью прибора Lockin в диапазоне от 0,01 Гц до 250 кГц при фиксированных значениях температуры в интервале 4,2–100 К.

Экспериментальные результаты

На рис. 1 представлены зависимости активного сопротивления Z' образцов с концентрацией примесей $2 \cdot 10^{18}$ и $5 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$. Здесь видно, что Z' зависит и от частоты ω , и от температуры T . При понижении температуры активное сопротивление исследованных образцов возрастает, что обусловлено вымораживанием носителей заряда.

Что касается зависимости активного сопротивления от частоты, то для каждого образца, в зависимости от степени легирования, существует низкотемпературный интервал, в котором при повышении частоты от 0 до 250 кГц значение Z' уменьшается почти в два раза, несмотря

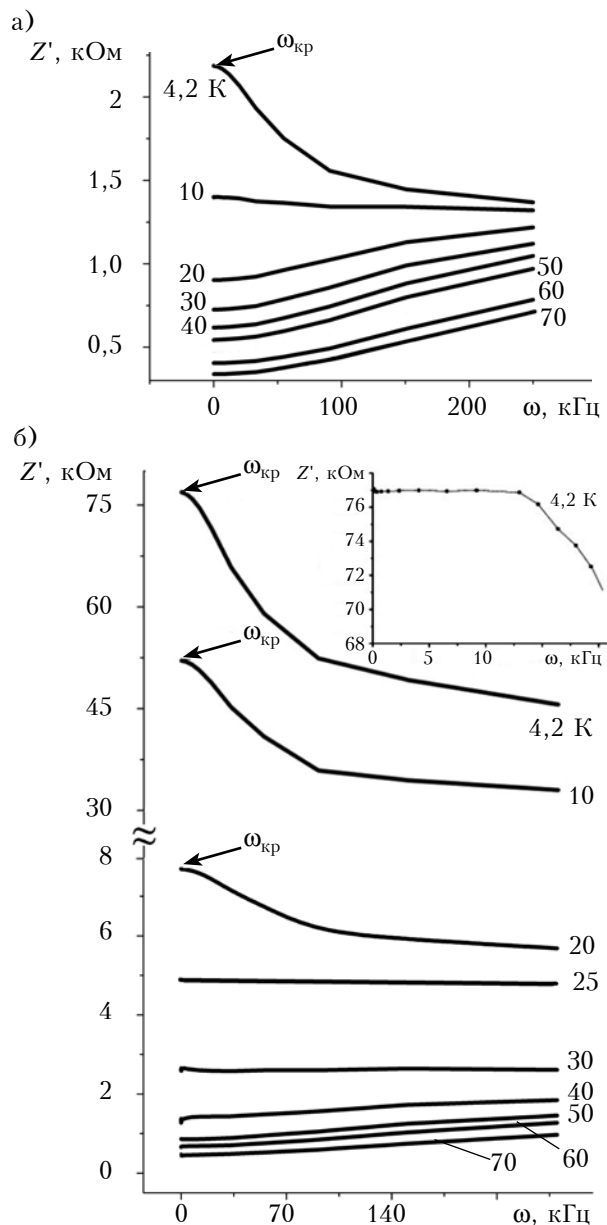


Рис. 1. Частотная зависимость действительной части сопротивления образцов НК Si с удельным сопротивлением $\rho_{300\text{K}}=0,0143$ Ом·см (а) и $\rho_{300\text{K}}=0,0168$ Ом·см (б) при различных значениях температуры (в К) (на вставке приведена часть кривой для 4,2 К в частотном диапазоне 0–20 кГц)

на значительное вымораживание носителей заряда. При этом Z' остается практически неизменным при повышении частоты до некоторого критического значения $\omega_{\text{кр}}$, которое соответствует началу прыжковой проводимости (проявляется в данных образцах при низких температурах как на постоянном, так и на переменном токе [12, 13]).

Для образцов НК Si с $\rho_{300\text{K}} = 0,0143$ Ом·см (рис. 1, а) такой эффект наблюдается лишь при гелиевой температуре. При 10 К активное сопротивление образца практически не зависит от ча-

стоты во всем исследованном диапазоне, а при более высоких температурах увеличение частоты от 0 до 250 кГц приводит к росту Z' примерно в 1,5 раза.

Для образцов с $\rho_{300\text{K}} = 0,0155$ Ом·см при понижении температуры наблюдается значительно больший рост активного сопротивления. Кроме того, эффект уменьшения Z' после достижения частотой значения $\omega_{\text{кр}}$ проявляется уже в интервале $T = 4,2 - 20$ К, в котором величина Z' начинает уменьшаться. При $T \approx 20$ К частотная зависимость активного сопротивления образцов становится уже достаточно слабой, а дальнейшее повышение температуры приводит к росту Z' с увеличением частоты.

В образцах с $\rho_{300\text{K}} = 0,0168$ Ом·см (рис. 1, б) наблюдается значительное увеличение активного сопротивления с понижением температуры до 4,2 К, а температурный интервал, в котором величина Z' начинает уменьшаться после достижения $\omega_{\text{кр}}$, расширяется до 25 К.

Таким образом, очевидна зависимость активного сопротивления не только от частоты тока, но и от концентрации легирующей примеси. Для иллюстрации данных закономерностей были построены графики зависимости критической частоты от удельного сопротивления при разных температурах.

Как видно из рис. 2, при фиксированной температуре исследуемых образцов НК Si в диапазоне 4,2–20 К увеличение удельного сопротивления приводит к линейному уменьшению частоты начала прыжковой проводимости $\omega_{\text{кр}}$, а увеличение температуры образца — к росту $\omega_{\text{кр}}$.

Поскольку в данных образцах НК Si при низких температурах основным механизмом переноса носителей заряда является прыжковая проводимость, величина и характер которой зависят от частоты тока [7], необходимо более детально проанализировать полученные результаты. Для примера рассмотрим частотные зависимости активного сопротивления образца

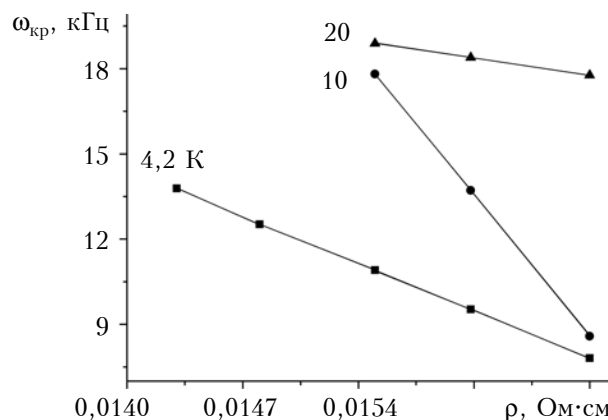


Рис. 2. Зависимость частоты начала прыжковой проводимости от удельного сопротивления образцов НК Si при различных температурах

с $\rho_{300\text{K}} = 0,0168 \text{ Ом}\cdot\text{см}$ в интервале $T = 4,2 - 20 \text{ К}$ (рис. 1, б). Их степенной характер указывает на прыжковый механизм проводимости, который, к тому же, обычно связывается с прыжками носителей заряда по локализованным состояниям с участием фононов (релаксационная проводимость) [7, 14, 15]. Близкая к линейной зависимость Z' от ω , которая наблюдается при низких частотах, описывается теорией низкотемпературной прыжковой проводимости при учете кулоновских корреляций локализованных носителей [16].

В [9, 10] линейность частотной зависимости низкотемпературной проводимости неупорядоченных полупроводников в области частот, меньших, чем частота начала бесфононной проводимости, интерпретируется как непосредственное проявление существования кулоновской щели. При одночастичной плотности состояний такая щель описывает распределение самосогласованных энергий взаимодействующих локализованных носителей заряда в основном состоянии системы. Действительно, в области промежуточных частот прыжковая проводимость определяется электронными переходами на дальние расстояния, и при этом, вообще-то говоря, следует учитывать кулоновское взаимодействие дальнего действия, обуславливающее появление кулоновской щели в одночастичной плотности состояний в окрестности уровня Ферми [17, 18].

Для экспериментального подтверждения существования кулоновской щели был использован метод исследования прыжковой проводимости с переменной длиной прыжка, которая оказывается чрезвычайно чувствительной к плотности состояний в окрестности уровня Ферми [19]. Образование кулоновской щели принято связывать с проявлением прыжковой проводимости Эфроса — Шкловского, что описывается следующей формулой:

$$\rho(T) \propto \rho_0 \exp \sqrt{\frac{T_1}{T}}, \quad (1)$$

где $T_1 = \beta_1 e_2 / (\chi \alpha)$;
 $\beta_1 = 2,7$;
 χ — диэлектрическая проницаемость среды;
 α — радиус локализации электрона.

Для подтверждения наличия кулоновской щели проанализируем представленную в полупрологифмических координатах на рис. 3 температурную зависимость удельного сопротивления кристаллов с концентрацией, соответствующей диэлектрической стороне перехода «металл — диэлектрик». Из рисунка видно, что характер зависимости удельного сопротивления от температуры — линейный, что соответствует формуле (1), а значит, закон Эфроса — Шкловского выполняется.

При расчете прыжковой проводимости в области частот, где она проявляется, использовалась уравнение

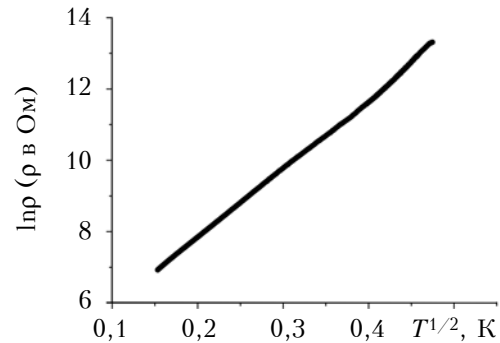


Рис. 3. Температурная зависимость проводимости для образца НК Si с $\rho_{300\text{K}} = 0,0168 \text{ Ом}\cdot\text{см}$

$$kT \ll [U(r_\omega) = e_2 / (\chi r_\omega)] \ll \Delta, \quad (2)$$

где k — постоянная Больцмана;

e — заряд носителя проводимости;

Δ — ширина кулоновской щели;

r_ω — межцентровое расстояние в парах, которые дают основной вклад в релаксационную проводимость.

Приближенная оценка ширины кулоновской щели согласно уравнению (2) дает значение порядка нескольких мэВ. Эта величина оказывается соизмеримой с энергией активации прыжковой проводимости в образцах, полученной из температурной зависимости сопротивления на рис. 3 и равной примерно 2,3 мэВ.

Таким образом, можно утверждать, что характер полученных частотных зависимостей проводимости нитевидных кристаллов кремния обусловлен тем, что при низких температурах основным механизмом переноса носителей заряда является прыжковая проводимость, инициируемая переменным током с частотой $\omega_{\text{кр}}$. В зависимости от концентрации легирующей примеси величина $\omega_{\text{кр}}$ меняется в пределах от 8 до 20 кГц.

На основании проведенных исследований нами разработан сенсор температуры, принцип действия которого основан на изменении сопротивления при изменении температуры. Учитывая особенности полученных частотных зависимостей, тензорезистор был сконструирован на основе НК Si с удельным сопротивлением $\rho_{300\text{K}} = 0,0168 \text{ Ом}\cdot\text{см}$, что обеспечило его работоспособность при криогенных температурах (рис. 4). Температурный коэффициент электрического сопротивления (ТКС) сенсора в интервале 4,2 — 100 К составляет приблизительно 0,1 К^{-1} .

На основе частотных зависимостей сопротивления был определен оптимальный частотный диапазон работы сенсора с целью обеспечения его стабильной работы с заданным ТКС и устранения влияния кулоновской щели на его выходные характеристики — от 1 до 8 кГц. Исследования показали, что предложенный сенсор может измерять абсолютную температуру с точностью 0,1 К. Инерционность датчика при измерении температуры составляет не более 60 мс.

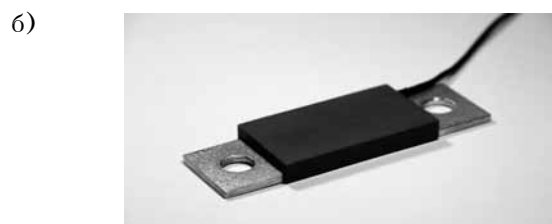
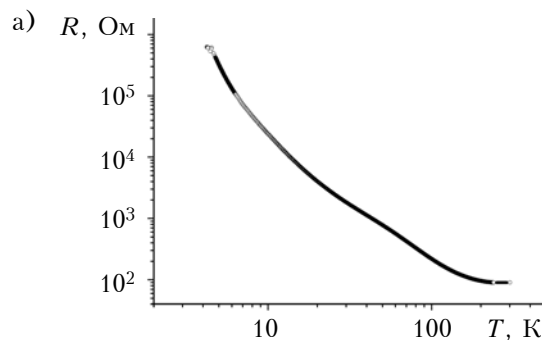


Рис. 4. Температурная зависимость изменения сопротивления (а) разработанного тензорезистора (б) на основе НК Si с $\rho_{300K}=0,0168 \text{ Ом}\cdot\text{см}$

Предложенный вариант сенсора работоспособен в условиях переменного тока, поскольку в этом случае отсутствует саморазогрев чувствительного элемента, а также «паразитные» термо-эдс, что в свою очередь влияет на точность измерения температуры.

Выводы

Таким образом, исследования нитевидных кристаллов кремния, легированных бором, показали, что в области низких температур (4,2–100 К) при частоте от 0 до 250 кГц на их активное сопротивление влияет концентрация примеси. При этом полученные результаты указывают на то, что в области температур 4,2–20 К при частоте от 8 до 20 кГц, в зависимости от степени легирования (удельного сопротивления), в исследованных образцах реализуется прыжковая проводимость с участием фононов, что приводит к существенному снижению величины Z'' при повышении частоты до 250 кГц. Уменьшение концентрации легирующей примеси смещает частоту начала прыжковой проводимости в диапазон более низких частот, что связано с проявлением кулоновской щели.

Установленные тензометрические характеристики микрокристаллов Si позволили разработать высокочувствительный температурный сенсор, работоспособный в интервале от 4,2 до 100 К с точностью измерения температуры до 0,1 К.

ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ

1. Pollak M. Approximations for the ac Impurity Hopping Conduction // *Phys. Rev.* — 1964. — A564. — P. 133. <https://doi.org/10.1103/PhysRev.133.A564>.
2. Dyre J.C., Schroder T.B. Universality of ac conduction in disordered solids // *Rev. Mod. Phys.* — 2000. — Vol. 72. — P. 873. <https://doi.org/10.1103/RevModPhys.72.873>

3. Zvyagin I.P. Charge transport via delocalized states in disordered materials // In book: *Charge Transport in Disordered Solids with Applications in Electronics* / Ed. by Baranovski S. — John Wiley & Sons, Chichester, 2006. — 498 p.
4. Druzhinin A., Ostrovskii I., Kogut I. et al. Magneto-transport properties of poly-silicon in SOI structures at low temperatures // *Materials Science in Semiconductor Processing.* — 2015. — Vol. 31. — P. 19–26. <http://dx.doi.org/10.1016/j.mssp.2014.11.014>
5. Sybous S., Kaaouachi A. El., Narjis A. et al. Study of variable range hopping conduction in insulating n-type InSb semiconductor at very low temperature // *ICMC AIP Conf. Proc.* — 2012. — Vol. 1435. — P. 377–384. — <http://dx.doi.org/10.1063/1.4712119>
6. Kaaouachi A. El. Screening and variable range hopping conduction in silicon MOSFETs at very low temperature // *Chinese Journal of Physics.* — Vol. 51, N 6. — 2013. — P.1312 – 1320. <http://dx.doi.org/10.6122/CJP.51.1312>
7. Pollak M., Geballe T.H. Low-frequency conductivity due to hopping processes in silicon // *Phys. Rev.* — 1961. — Vol.122. — P. 1742. <https://doi.org/10.1103/PhysRev.122.1742>
8. 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. <http://dx.doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.854.49>
9. Ritz E., Dressel M. Influence of electronic correlations on the frequency-dependent hopping transport in Si:P // *Phys. Status Solidi C.* — 2008. — Vol. 5. — P. 703. <http://dx.doi.org/10.1002/pssc.200777583>
10. Hering M., Scheffler, Dressel M., Lohneysen H.V. Signature of electronic correlations in the optical conductivity of the doped semiconductor Si:P // *Phys. Rev. B.* — 2007. — Vol. 75. — P. 205–203. <https://doi.org/10.1103/PhysRevB.75.205203>
11. Helgren E., Armitage N.P., Gruner G. Frequency-dependent conductivity of electron glasses // *Phys. Rev. B.* — 2004. — Vol. 69. — P. 014–201. <https://doi.org/10.1103/PhysRevB.69.014201>
12. Druzhinin A., Ostrovskii I., Khoverko Y., Koretskii R. Strain-induced effects in p-type Si whiskers at low temperatures // *Materials Science in Semiconductor Processing.* — Vol. 40. — 2015. — P. 766–771. <http://dx.doi.org/10.1016/j.mssp.2015.07.015>
13. Druzhinin A., Ostrovskii I., Khoverko Yu. et al. Variable-range hopping conductance in Si whiskers // *Phys. Status Solidi A.* — 2014. — Vol. 211, N 2. — P. 504–508. <http://dx.doi.org/10.1002/pssa.201300162>
14. Austin I.G., Mott N.F. Polarons in crystalline and non-crystalline materials // *Adv. Phys.* — 1969. — Vol.18. — P. 41. <http://dx.doi.org/10.1080/00018736900101267>
15. Efros A.L. On the theory of a.c. conductivity in amorphous semiconductors // *Phil. Mag. B.* — 1981. — Vol. 43. — P. 829. <http://dx.doi.org/10.1080/01418638108222349>
16. Shklovskii B.I., Efros A.L. Zero-phonon ac hopping conductivity of disordered systems // *Journal of Experimental and Theoretical Physics.* — 1981. — Vol. 54, № 1. — P. 218–222.
17. Mott N.F. Conduction in non-crystalline systems IV. Anderson localization in a disordered lattice // *Phil. Mag.* — 1970. — Vol. 22. — P. 7–29. <http://dx.doi.org/10.1080/14786437008228147>
18. Efros A.L., Shklovskii B.I. Coulomb gap and low temperature conductivity of disordered systems // *J. Phys. C:Sol. St. Phys.* — 1975. — Vol. 8. — P. 49. <http://dx.doi.org/10.1088/0022-3719/8/4/003>
19. Забродский А.Г. Кулоновская щель и фазовый переход металл-изолятор в легированных полупроводниках // *Успехи физ. наук.* — 1998. — Т.168, №7. — С.804–808. <http://dx.doi.org/10.3367/UFNr.0168.199807h.0804>

Дата поступления рукописи
в редакцию 06.06 2016 г.

А. А. ДРУЖИНІН, І. П. ОСТРОВСЬКИЙ,
Ю. Н. ХОВЕРКО, Р. Н. КОРЕЦЬКИЙ

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

ДОСЛІДЖЕННЯ ЧАСТОТНОЇ ЗАЛЕЖНОСТІ ПРОВІДНОСТІ НИТКОПОДІБНИХ КРИСТАЛІВ КРЕМНІЮ ПРИ КРІОГЕННИХ ТЕМПЕРАТУРАХ ДЛЯ СТВОРЕННЯ СЕНСОРІВ ТЕМПЕРАТУРИ НА ЇХ ОСНОВІ

Дослідження особливостей низькотемпературної провідності напівпровідникових ниткоподібних кристалів (НК) кремнію відіграють значну роль при розробці електронних приладів, зокрема сенсорів температури.

Результати досліджень активної складової імпедансу Z' НК кремнію, отримані при кріогенних температурах, вказують на її збільшення при зниженні температури і частотну залежність в діапазоні від 0 до 250 кГц. При цьому встановлено, що в температурному діапазоні 4,2–20 К при частоті $\omega_{кр}$, яка може дорівнювати від 8 до 20 кГц в залежності від питомого опору та температури, в зразках реалізується стрибкова провідність за участю фононів, що призводить до суттєвого зниження величини Z' при підвищенні частоти до 250 кГц. Наприклад, при температурі 4,2 К для зразка з питомим опором $\rho_{300K} = 0,0168$ Ом·см частота $\omega_{кр}$ дорівнює 8 кГц, і в діапазоні до 250 кГц активна складова імпедансу знижується майже вдвічі. Така загальна поведінка частотної характеристики зразка зберігається аж до 20 К, при 25 К величина Z' практично не залежить від частоти, а при більш високих температурах при підвищенні частоти вона несуттєво зростає. Зменшення питомого опору зразків призводить до звуження температурного інтервалу, в якому реалізується стрибкова провідність, і при $\rho_{300K} = 0,0143$ Ом·см вона спостерігається тільки в області гелієвої температури.

Зсув частоти початку стрибкової провідності $\omega_{кр}$ від 8 до 20 кГц, в залежності як від температури, так і від величини питомого опору досліджуваних кристалів кремнію, пов'язаний зі зміною концентрації вільних носіїв заряду в зразках, оскільки саме вона обумовлює вплив кулонівської щільності на $\omega_{кр}$.

Експериментальні дослідження низькотемпературної провідності ниткоподібних кристалів кремнію дозволили запропонувати працездатний в інтервалі 4,2–100 К сенсор температури. Сенсор працює на змінному струмі, оскільки це дозволяє уникнути саморозігріву чутливого елемента, а також виникнення «паразитних» термо-ерс, що теж впливає на точність вимірювання температури.

Ключові слова: мікрокристал, частота, провідність, сенсор, кріогенна температура.

DOI: 10.15222/TKEA2016.4-5.47
UDC 621.315.592

A. A. DRUZHININ, I. P. OSTROVSKY,
Yu. N. KHOVERKO, R. N. KORETSKY

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

A STUDY OF THE FREQUENCY DEPENDENCE OF CONDUCTIVITY OF SILICON WHISKERS AT CRYOGENIC TEMPERATURES AS BASIS FOR THE TEMPERATURE SENSORS

Studies of low-temperature features of semiconductor silicon whisker conductivity play a significant role in the development of electronic devices, such as temperature sensors.

The results of studies of the active component of impedance Z' for silicon whiskers obtained at cryogenic temperatures, indicating the increase of its value under temperature decreasing, and showing the frequency dependence in the range from 0 to 250 kHz. It was found that in temperature range 4.2–20 K at a frequency $\omega_{кр}$ which can amount from 8 to 20 kHz, depending on resistivity and temperature, the hopping conduction with the participation of phonons is observed in whisker samples, resulting in a significant reduction of Z' value at frequencies up to 250 kHz. For example, at a temperature of 4.2 K for the sample with resistivity $\rho_{300K}=0.0168$ Ohm·cm the frequency $\omega_{кр}$ is equal to 8 kHz, and in frequency range up to 250 kHz the active component of impedance is reduced approximately by half. Such behavior of the frequency response for these samples is kept up to 20 K, whereas at 25 K the value of Z' is almost independent of frequency, and at higher temperatures with the increasing of frequency, it slightly increases. Reducing the resistivity of the samples leads to a narrowing of the temperature range, where the hopping conduction is observed, and at $\rho_{300K} = 0.0143$ Ohm·cm it is observed only at a helium temperature.

Offset of the frequency ω_{kp} from 8 to 20 kHz at the hopping conduction beginning, depending on temperature and the value of resistivity for studied silicon crystals, can be attributed to the change of free charge carriers concentration in such samples, because it determines the effect of Coulomb gap on ω_{kp} .

Experimental study of low-temperature conductivity of silicon whiskers allowed proposing the temperature sensor operable at temperature range 4.2–100 K. The sensor works on alternating current, because it avoids the self-heating of sensitive element and the occurrence of «parasitic» thermopower, which also affects the accuracy of temperature measurement.

Key words: microcrystal, frequency, conductivity, sensor, cryogenic temperature.

REFERENCES

1. Pollak M. Approximations for the ac Impurity Hopping Conduction. Phys. Rev., 1964, A564, pp. 133. <https://doi.org/10.1103/PhysRev.133.A564>.
2. Dyre J.C., Schroder T.B. Universality of ac conduction in disordered solids. Rev. Mod. Phys., 2000, vol. 72, pp. 873. <https://doi.org/10.1103/RevModPhys.72.873>
3. Zvyagin I.P. Charge transport via delocalized states in disordered materials. In book: Charge Transport in Disordered Solids with Applications in Electronics. Ed. by Baranovski S., John Wiley & Sons, Chichester, 2006, 498 p.
4. Druzhinin A., Ostrovskii I., Kogut I., Khoverko Yu., Koretskii R., Kogut Iu. Magneto-transport properties of poly-silicon in SOI structures at low temperatures. Materials Science in Semiconductor Processing, 2015, vol. 31, pp. 19-26. Vol. 31. — P. 19–26. <http://dx.doi.org/10.1016/j.mssp.2014.11.014>
5. Sybous S., Kaaouachi A. El., Narjis A., Limouny L., Dlimi S. Study of variable range hopping conduction in insulating n-type InSb semiconductor at very low temperature. ICMC AIP Conf. Proc., 2012, vol. 1435, pp. 377-384. <http://dx.doi.org/10.1063/1.4712119>
6. Kaaouachi A. El. Screening and variable range hopping conduction in silicon MOSFETs at very low temperature. Chinese Journal of Physics, vol. 51, no 6, 2013, pp. 1312-1320. <http://dx.doi.org/10.6122/CJP.51.1312>
7. Pollak M., Geballe T.H. Low-frequency conductivity due to hopping processes in silicon. Phys. Rev., 1961, vol.122, pp. 1742. <https://doi.org/10.1103/PhysRev.122.1742>
8. 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. <http://dx.doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.854.49>
9. Ritz E., Dressel M. Influence of electronic correlations on the frequency-dependent hopping transport in Si:P. Phys. Status Solidi C., 2008, vol. 5, pp. 703. <http://dx.doi.org/10.1002/pssc.200777583>
10. Hering M., Scheffler, Dressel M., Lohneysen H.V. Signature of electronic correlations in the optical conductivity of the doped semiconductor Si:P. Phys. Rev. B., 2007, vol. 75, pp. 205-203. <https://doi.org/10.1103/PhysRevB.75.205203>
11. Helgren E., Armitage N.P., Gruner G. Frequency-dependent conductivity of electron glasses. Phys. Rev. B., 2004, vol. 69, pp. 014-201. <https://doi.org/10.1103/PhysRevB.69.014201>
12. Druzhinin A., Ostrovskii I., Khoverko Y., Koretskii R. Strain-induced effects in p-type Si whiskers at low temperatures. Materials Science in Semiconductor Processing, vol. 40, 2015, pp. 766-771. <http://dx.doi.org/10.1016/j.mssp.2015.07.015>
13. 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, no 2, pp. 504-508. <http://dx.doi.org/10.1002/pssa.201300162>
14. Austin I.G., Mott N.F. Polarons in crystalline and non-crystalline materials. Adv. Phys., 1969, vol.18, pp. 41. <http://dx.doi.org/10.1080/00018736900101267>
15. Efros A.L. On the theory of a.c. conductivity in amorphous semiconductors. Phil. Mag. B, 1981, vol. 43, pp. 829. <http://dx.doi.org/10.1080/01418638108222349>
16. Shklovskii B.I., Efros A.L. Zero-phonon ac hopping conductivity of disordered systems. Journal of Experimental and Theoretical Physics, 1981, vol. 54, no 1, p. 218-222.
17. Mott N.F. Conduction in non-Crystalline systems IV. Anderson localization in a disordered. Phil. Mag., 1970, vol. 22, pp. 7-29. <http://dx.doi.org/10.1080/14786437008228147>
18. Efros A.L., Shklovskii B.I. Coulomb gap and low temperature conductivity of disordered systems. J. Phys. C:Sol. St. Phys., 1975, vol. 8, p. 49. <http://dx.doi.org/10.1088/0022-3719/8/4/003>
19. Zabrodskii A.G. Coulomb gap and metal-insulator transitions in doped semiconductors. Phys. Usp. 41 722–726 (1998). <http://dx.doi.org/10.1070/PU1998v041n07ABEH000422>