

УДК 621.315.592

ОСОБЕННОСТИ НИЗКОТЕМПЕРАТУРНОЙ ПРОВОДИМОСТИ НИТЕВИДНЫХ КРИСТАЛЛОВ ДЛЯ КРЕМНИЕВЫХ СЕНСОРОВ ТЕМПЕРАТУРЫ

Д. т. н. А. А. Дружинин^{1,2}, д. т. н. И. П. Островский^{1,2}, к. т. н. Ю. Н. Ховерко^{1,2},
к. т. н. Р. Н. Корецкий¹

¹ Национальный университет «Львовская политехника», Украина, г. Львов;

² Международная лаборатория сильных магнитных полей и низких температур,
Польша, г. Вроцлав
druzh@polynet.lviv.ua

Исследованы частотные зависимости активного сопротивления нитевидных кристаллов кремния с концентрацией легирующей примеси, соответствующей диэлектрической стороне перехода «металл—диэлектрик» ($N_c < 5 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$), в частотном диапазоне $0,01\text{--}250 \cdot 10^3 \text{ Гц}$. Проведен анализ особенностей механизма переноса носителей заряда в кристаллах при криогенных температурах в интервале $4,2\text{--}70 \text{ К}$ для создания кремниевых сенсоров температуры.

Ключевые слова: нитевидный кристалл, прыжковая проводимость, криогенные температуры.

Как известно, измерения частотной зависимости импеданса является одним из важных методов получения информации о механизмах проводимости в полупроводниковых материалах [1—4]. Особенно актуальны исследования частотных характеристик полупроводников в области низких температур, где реализуется прыжковая проводимость [5]. Для многих неупорядоченных материалов (аморфные и сильнолегированные полупроводники, полупроводниковые стекла, проводящие полимеры, гранулированные проводники и т. п.) частотная зависимость действительной части проводимости имеет степенной характер ($\rho \sim \omega^s$) [1]. В низкочастотной области, как правило, $0 < s < 1$; в области высоких частот $s > 1$, что указывает на характерные особенности структуры материала. Изменение характера частотной зависимости проводимости с увеличением частоты наблюдается для многих полупроводников [6].

Целью работы является исследование особенностей низкотемпературной проводимости нитевидных кристаллов кремния с концентрацией носителей заряда вблизи перехода «металл—диэлектрик» (ПМД) и установление механизма переноса носителей заряда в них, что существенно при разработке электронных приборов, в частности, создание сенсоров криогенных температур.

Нитевидные кристаллы Si были выращены методом химических транспортных реакций в закрытой бромидной системе с использованием как примесей бора для легирования, так и примеси золота в качестве инициатора роста. Концентрация легирующей примеси в кристаллах изменялась от $2 \cdot 10^{18}$ до $5 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$ и соответствовала диэлектрической стороне ПМД, при котором температурная зависимость сопротивления приобретает полупроводниковый характер. Контакты к кристаллам были созданы методом дуговой сварки платинового микропровода диаметром $15 \cdot 10^{-6} \text{ м}$. Частотные зависимости активного сопротивления НК кремния измерялись с помощью прибора Lockin в частотном диапазоне $0,01\text{--}250 \cdot 10^3 \text{ Гц}$ при фиксированных значениях температуры в интервале $4,2\text{--}70 \text{ К}$.

Изучены особенности частотной зависимости активного сопротивления нитевидных кристаллов кремния, что позволило получить важную информацию о механизмах проводимости, которые реализуются в исследуемых кристаллах при низких температурах. В частности, исследовано влияние концентрации примеси бора на сопротивление нитевидных кристаллов кремния в области низких температур и его изменение с ростом частоты до 250 кГц . Полученные результаты указывают на увеличение проводимости кристаллов для криогенных температур и его частотную зависимость в диапа-

зоне от 8 до 20 кГц. Как показывают исследования, в НК Si при температуре 4,2 К наблюдается уменьшение частоты тока вплоть до 8 кГц, при которой происходит уменьшение активной составляющей импеданса с увеличением удельного сопротивления от 0,0143 до 0,0168 Ом·см. Повышение температуры до 25 К сопровождается аналогичным уменьшением частоты, при которой происходит уменьшение как активной составляющей импеданса, так и удельного сопротивления кристаллов. Однако отмечается повышение частоты по отношению к такому же удельному сопротивлению при более низкой температуре. Частота, при которой происходит уменьшение активного сопротивления, соответствует частоте начала прыжковой проводимости, которая проявляется в данных образцах при низких температурах как на постоянном, так и переменном токах, что было отображено ранее в [7]. Проявление частотной зависимости в исследуемых кристаллах в низкочастотном интервале, по-видимому, связано с реализацией прыжковой проводимости с участием фононов. Смещение частоты начала прыжковой проводимости от 8 до 20 кГц в зависимости от температуры, как и значение удельного сопротивления исследуемых кристаллов кремния, обусловлено изменением концентрации свободных носителей заряда, поскольку в области промежуточных частот, в которой находится данный исследуемый частотный диапазон, прыжковая проводимость в кристаллах происходит с участием фононов. Такие переходы носителей заряда с участием фононов происходят на дальние расстояния; при этом следует учитывать дальнедействующий характер кулоновского взаимодействия, что обуславливает возникновение кулоновской щели в плотности состояний $\rho(E)$ в окрестности уровня Ферми. Можно предположить, что именно изменения концентрации свободных носителей заряда вследствие воздействия температуры или легирующей примеси обуславливает изменения влияния кулоновской щели на частоту начала прыжковой проводимости.

Результаты анализа экспериментальных данных о низкотемпературной проводимости нитевидных микрокристаллов кремния с концентрацией легирующей примеси, соответствующей диэлектрической стороне перехода «металл—диэлектрик» ($N_c < 5 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$) в частотном диапазоне 0,01–250 · 10³ Гц использованы при разработке сенсоров температуры, работоспособных в сложных условиях эксплуатации. Учитывая сильную температурную зависимость активной составляющей импеданса в температурном интервале 8—25 К, предложено использовать в таких условиях сенсор температуры на основе нитевидного кристалла кремния с $\text{TKO} \approx 10\% \cdot \text{K}^{-1}$. Предложенный вариант сенсора работоспособен также в условиях переменного тока, поскольку это дает возможность избежать саморазогрева чувствительного элемента сенсора, а также исключить возникновения «паразитных» термо-эдс, что, в свою очередь, влияет на точность измерения температуры.

ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ

1. Pollak M. Approximations for the ac Impurity Hopping // *Conduction Phys. Rev.*– 1964.– A564.– P.133.
2. Dyre J.C., Schroder T.B. Universality of ac conduction in disordered solids // *Rev. Mod. Phys.*– 2000.– 72.– P. 873.
3. Zvyagin I.P. In: *Charge Transport in Disordered Solids with Applications in Electronics* /Ed. By S. Baranovskii.– Chichester: John Wiley & Sons, 2006.
4. Druzhinin A., Ostrovskii I., Khoverko Y., Koretskii R. Strain-induced effects in p-type Si whiskers at low temperatures // *Materials Science in Semiconductor Processing.*– 2015.– Vol. 40.– P. 766–771.
5. Kaaouachi A. El. Screening and variable range hopping conduction in Silicon MOSFETs at very low temperature // *The International Cryogenics Materials Conference.* – USA, Anchorage – 2013.– P. 65.
6. Ritz E., Dressel M. Influence of electronic correlations on the frequency-dependent hopping transport in Si:P // *Phys. Status Solidi C.*– 2008.– 5.– P. 703.
7. Druzhinin A., I. Ostrovskii, Khoverko Yu., Nichkalo S., Koretskyy R., Kogut Iu. Variable-range hopping conductance in Si whiskers // *Phys. Status Solidi A.*– 2014.– N 2.– P. 504–508.

A. A. Druzhinin, I. P. Ostrovskii, Y. N. Khoverko, R. M. Koretskyy

Features of low-temperature conductivity of silicon whiskers for temperature sensors

The authors studied the frequency dependence of resistance of silicon whiskers with a dopant concentration, corresponding to the dielectric of the metal-insulator transition ($N_c < 5 \cdot 10^{18} \text{ cm}^{-3}$) in the frequency range of 0,01—250 · 10³ Hz. The mechanisms of charge transport in crystals at cryogenic temperatures in the range of 4.2—70 K in are analyzed in order to use the research results in the temperature sensor.

Keywords: *hopping conduction, whiskers, cryogenic temperature.*