

ФИЗИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

PHYSICAL CHARACTERISTICS AND THEIR STUDY

*Известия высших учебных заведений. Материалы электронной техники. 2015. Т. 18, № 1. С. 69–74.
ISSN 1609–3577. DOI: 10.17073/1609–3577–2015–1–69–74*

УДК 621.315.592

МАГНЕТСОПРОТИВЛЕНИЕ ОБЛУЧЕННЫХ ПРОТОНАМИ НИТЕВИДНЫХ КРИСТАЛЛОВ $\text{Si}_{0,97}\text{Ge}_{0,03}$

Нитевидные кристаллы — это новый материал, который характеризуется высоким структурным совершенством, химической стойкостью, прочностью, которая для кристаллов небольших поперечных размеров достигает теоретически возможного предела. Исследованные нитевидные кристаллы получены методом химических транспортных реакций в закрытой бромидной системе с использованием золота в качестве инициатора роста. Кристаллы облучали протонами с энергией 6 МэВ и дозами $5 \cdot 10^{13}$, 10^{15} и $1 \cdot 10^{17}$ р⁺/см⁻² при 40 °С на циклотроне У–120.

Изучено влияние протонного облучения и сильных магнитных полей на магнетосопротивление нитевидных кристаллов $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$ ($x = 0,03$) в интервале температур 4,2–300 К. Обнаружено незначительное уменьшение электрического сопротивления кристаллов в температурной области 4,2–40 К в процессе облучения малыми дозами протонов и существенное увеличение сопротивления во всей исследуемой температурной области при облучении дозой $1 \cdot 10^{17}$ р⁺/см². Рассчитана энергия ионизации примесных атомов в разных магнитных полях. Установлено, что энергия примесного уровня практически не зависит от магнитного поля, что, в свою очередь, говорит о независимости концентрации дырок от магнитного поля. Показано, что существенное магнетосопротивление при всех исследованных температурах связано с магнитополевым уменьшением подвижности свободных носителей заряда (дырок). Установлено, что концентрация дырок практически не зависит от магнитного поля. Сделан вывод, что расширение запрещенной зоны в магнитных полях до 8 Тл незначительно.

Ключевые слова: нитевидные кристаллы, кремний–германий, протонное облучение, сопротивление, магнитное поле, магнетосопротивление, подвижность.

© 2015 г. Н. Т. Павловская¹, П. Г. Литовченко¹,
Ю. О. Угрин², Ю. В. Павловский²,
И. П. Островский³, К. Рогацкий⁴

¹Институт ядерных исследований НАН Украины,
просп. Науки, д. 47, Киев, 03680, Украина

²Дрогобычский государственный
педагогический университет имени Ивана Франко,
ул. Ивана Франко, д. 24, Дрогобыч, 82100, Украина

³Национальный университет «Львовская политехника»,
ул. С. Бандеры, д. 12, Львов, 79013, Украина

⁴Международная лаборатория
сильных магнитных полей и низких температур,
ул. Гайовицкая, д. 95, Вроцлав, 53–421, Польша

Введение

Перед современной микроэлектроникой стоит важнейшее задание — получение материалов нового класса. Одним из таких новых материалов являются нитевидные кристаллы, которые характеризуются высоким структурным совершенством, химической стойкостью, прочностью, которая для кристаллов небольших поперечных размеров достигает теоретически возможного предела [1].

Нитевидные кристаллы (НК) находят ряд научных и практических применений. Например, из полупроводниковых НК можно получать высокочувствительные тензодатчики [2]. На их базе соз-

дают сенсоры деформации и давления, работоспособные в широких пределах относительных деформаций (10^{-5} — $5 \cdot 10^{-3}$ отн. ед.) и давлений (1 — 10^4 кбар) [3–5]. На протяжении последних десятилетий проводятся работы по созданию на основе НК композиционных материалов с высокими прочностными параметрами. В частности, предел прочности НК Si–Ge диаметром 5 мкм достигает 5 % [6]. Установлен также ряд размерных эффектов в НК Si. При уменьшении диаметра субмикронных НК имеет место уменьшение параметра решетки [7] и смещение края оптического поглощения в сторону высоких энергий [8]. Наблюдаемые особенности НК Si связывают или с от-

Павловская Надежда Тарасовна¹ — аспирант e-mail: pavlovskyy@mail.ru; Литовченко Петр Григорьевич¹ — доктор физ.–мат. наук, зав. отделом радиационной физики; Угрин Юрий Орестович² — кандидат физ.–мат. наук, доцент; Павловский Юрий Викторович² — кандидат физ.–мат. наук, доцент; Островский Игорь Петрович³ — доктор тех. наук, профессор; Рогацкий Кшиштоф⁴ — доктор физ.–мат. наук, профессор.

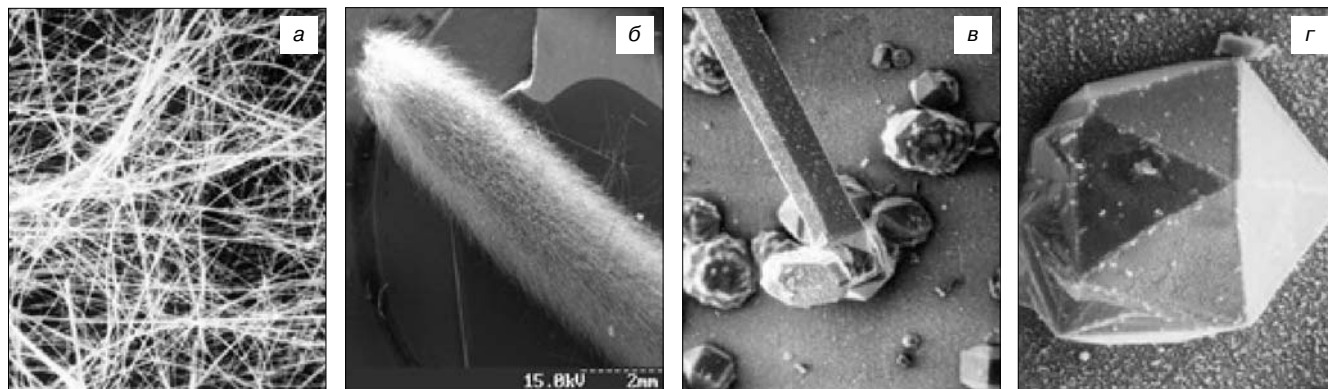


Рис. 1. Образование различных морфологических форм НК в зависимости от температуры кристаллизации: а — квазицилиндрические НК (диаметром 0,1—0,9 мкм); б — двойниковые НК (диаметром 1—2 мкм); в — шестигранные иглообразные НК (диаметром 5—150 мкм); г — изометрические кристаллы (размером 0,1—0,5 мм)

Fig. 1. Formation of differently shaped whiskers depending on crystallization temperature: (a) quasicylindrical whiskers (0.1—0.9 μm in diameter), (b) twin whiskers (1—2 μm in diameter), (c) hexagonal needle whiskers (5—150 μm in diameter) and (d) isometric whiskers (0.1—0.5 mm in diameter)

сутствием дефектов в кристаллической решетке, или с особым их расположением, или с влиянием поверхности. На НК наблюдали интересные магнитные свойства, связанные с возможным образованием суперпарамагнитных кластеров в НК субмикронного диаметра [9]. С другой стороны, высокое совершенство структуры исходных НК позволяет моделировать дефекты, образующиеся в процессе облучения. Так, в работах [10] и [11] исследовали радиационные дефекты, образующиеся в сильно легированных НК $p\text{-Si}_{1-x}\text{Ge}_x$ под воздействием облучения электронами и γ -квантами (до 10^{18} см^{-2}) соответственно. Как показали проведенные исследования, основными дефектами в кристаллах являются вторичные радиационные дефекты межузельных атомов бора — вакансии. Влияние протонного облучения на электрофизические свойства НК $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$ практически не изучено.

Цель работы — исследование магнетосопротивления НК $\text{Si}_{0,97}\text{Ge}_{0,03}$, облученных разными дозами протонов.

Образцы и методы исследования

Выращивание НК SiGe проводили методом химических транспортных реакций в закрытой бромидной системе с использованием золота в качестве инициатора роста. В ростовую ампулу загружали ростовой материал (кремний, германий), легирующие примеси (бор) и галоген (бром), который использовали как транспортирующий агент. Ампулу откачивали до давления 10^{-5} мм рт. ст. и помещали в трубчатую печь с градиентом температуры. Температура зоны источника составляла 900 °С, зоны кристаллизации — 550—750 °С.

С одной затравки получены кристаллы разной морфологии (рис. 1).

Содержание германия в твердом растворе $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$ определяли методом микронзондового анализа на установке САМЕВАХ. Оно составило $x = 0,03\%$ (моль).

Для исследования воздействия протонного облучения отобраны НК диаметром 40 ± 2 мкм и длиной 2—3 мм (см. рис. 1, в). Они являются кристаллами p -типа проводимости с удельным сопротивлением $\rho = 0,018$ Ом·см.

Кристаллы облучали протонами с энергией 6 МэВ и дозами $5 \cdot 10^{13}$, 10^{15} и $1 \cdot 10^{17}$ $\text{p}^+/\text{см}^2$ при 40 °С на циклотроне У-120 Института ядерных исследований НАН Украины.

После облучения проводили измерения магнетосопротивления в магнитных полях до 8 Тл в температурном интервале от 4,2 до 300 К в Международной лаборатории сильных магнитных полей и низких температур (г. Вроцлав, Польша).

Результаты и их обсуждение

Облучение минимальной дозой протонов не вызвало существенных изменений электрического сопротивления и магнетосопротивления НК во всем исследуемом температурном интервале. Облучение дозой 10^{15} $\text{p}^+/\text{см}^2$ привело к существенному уменьшению электрического сопротивления НК $\text{Si}_{0,97}\text{Ge}_{0,03}$ в интервале температур 4,2—40 К (рис. 2) и незначительному уменьшению магнетосопротивления в магнитных полях 10—14 Тл (рис. 3). Установлено, что изменение сопротивления при 4,2 К более выражено в образцах с большей концентрацией свободных носителей: сопротивление уменьшается почти вдвое в НК с удельным сопротивлением $\rho_{300\text{K}} = 0,018$ Ом·см (см. рис. 2), тогда как в кристаллах с $\rho_{300\text{K}} = 0,025$ Ом·см оно уменьшается только на 10 % (рис. 4).

При облучении НК $\text{Si}_{0,97}\text{Ge}_{0,03}$ протонами с энергией 6 МэВ и дозой $1 \cdot 10^{17}$ $\text{p}^+/\text{см}^2$ наблюдается существенное увеличение электрического сопротивления даже в кристаллах с $\rho_{300\text{K}} = 0,025$ Ом·см в сравнении с необлученными образцами (рис. 5), а также значительные изменения магнетосопротивления в низкотемпературной области (рис. 6, 7).

Можно допустить, что в малых дозах при низких температурах облучение не приводит к возникнове-

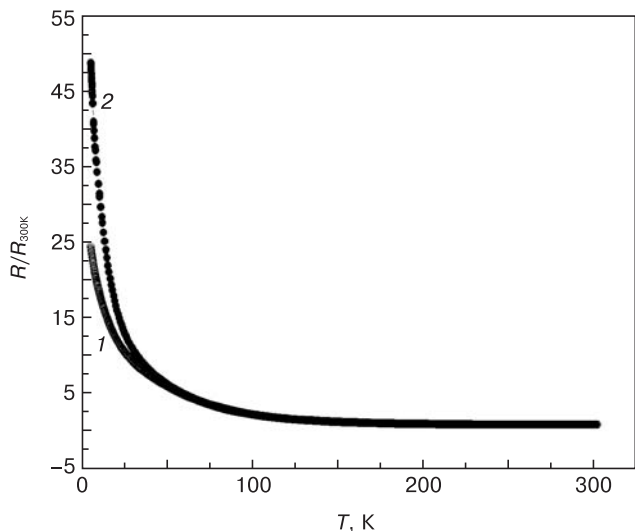


Рис. 2. Температурные зависимости относительного изменения электрического сопротивления НК $\text{Si}_{0.97}\text{Ge}_{0.03}$ с $\rho_{300\text{K}} = 0,018 \text{ Ом} \cdot \text{см}$ до (1) и после (2) облучения протонами с энергией 6 МэВ и дозой $\Phi = 10^{15} \text{ p}^+/\text{см}^2$

Fig. 2. Relative change in the electrical resistivity of $\text{Si}_{0.97}\text{Ge}_{0.03}$ whiskers with $\rho_{300\text{K}} = 0.018 \text{ Ohm.cm}$ as a function of temperature (1) before and (2) after 6 MeV proton irradiation with a dose of $10^{15} \text{ p}^+/\text{cm}^2$

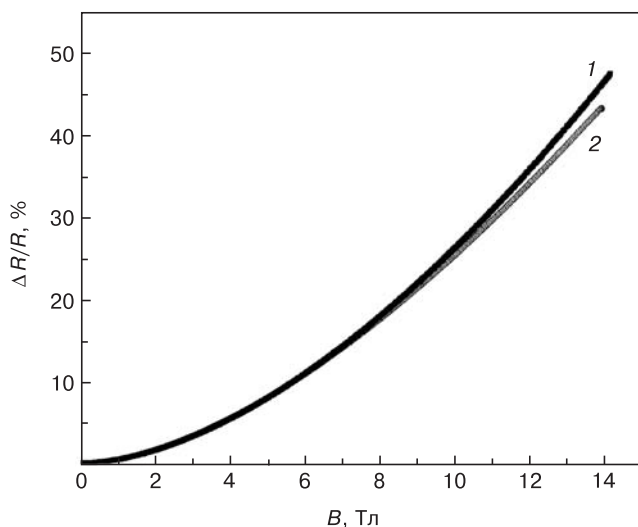


Рис. 3. Полевые зависимости магнетосопротивления НК $\text{Si}_{0.97}\text{Ge}_{0.03}$ с $\rho_{300\text{K}} = 0,018 \text{ Ом} \cdot \text{см}$ до (1) и после (2) облучения протонами с энергией 6 МэВ и дозой $\Phi = 10^{15} \text{ p}^+/\text{см}^2$

Fig. 3. Field dependence of the magnetoresistance of $\text{Si}_{0.97}\text{Ge}_{0.03}$ whiskers with $\rho_{300\text{K}} = 0.018 \text{ Ohm.cm}$ as a function of temperature (1) before and (2) after 6 MeV proton irradiation with a dose of $10^{15} \text{ p}^+/\text{cm}^2$

нию избыточных носителей заряда, а скорее всего способствует перераспределению плотности состояний в примесной зоне кристалла. В результате при этих дозах облучения возбуждаются атомы примеси, которые одновременно захватывают два носителя заряда с антипараллельными спинами. Следствием облучения может быть инверсная заселенность возбужденных уровней примеси. При таких условиях доминирующим типом проводимости должна быть прыжковая проводимость по верхней зоне Хаббарда [12]. В этом случае облучение должно привести к большим изменениям электрического сопротивления в образцах с большей концентрацией примеси,

что и наблюдалось экспериментально (см. рис. 2 и 4). Большие дозы облучения приводят к образованию макродефектов в кристалле, что сопровождается значительным рассеиванием носителей заряда на этих дефектах и существенным возрастанием электрического сопротивления кристаллов (см. рис. 5).

Как видно из рис. 6 и 7, при всех температурах измерения магнетосопротивление облученных НК не зависит от магнитного поля в слабых полях, удовлетворяя условию слабого поля $\mu_p B \ll 1$, где $\mu_p \approx 10^4 \text{ см}^2/(\text{В} \cdot \text{с})$ — подвижность дырок [13]. Далее при возрастании магнитного поля магнетосопротив-

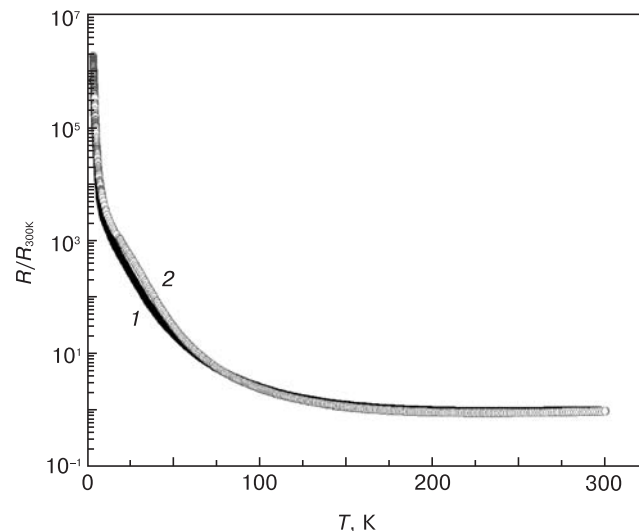


Рис. 4. Температурные зависимости относительного изменения электрического сопротивления НК $\text{Si}_{0.97}\text{Ge}_{0.03}$ с $\rho_{300\text{K}} = 0,025 \text{ Ом} \cdot \text{см}$ до (1) и после (2) облучения протонами с энергией 6 МэВ и дозой $\Phi = 10^{15} \text{ p}^+/\text{см}^2$

Fig. 4. Relative change in the electrical resistivity of $\text{Si}_{0.97}\text{Ge}_{0.03}$ whiskers with $\rho_{300\text{K}} = 0.025 \text{ Ohm.cm}$ as a function of temperature (1) before and (2) after 6 MeV proton irradiation with a dose of $10^{15} \text{ p}^+/\text{cm}^2$

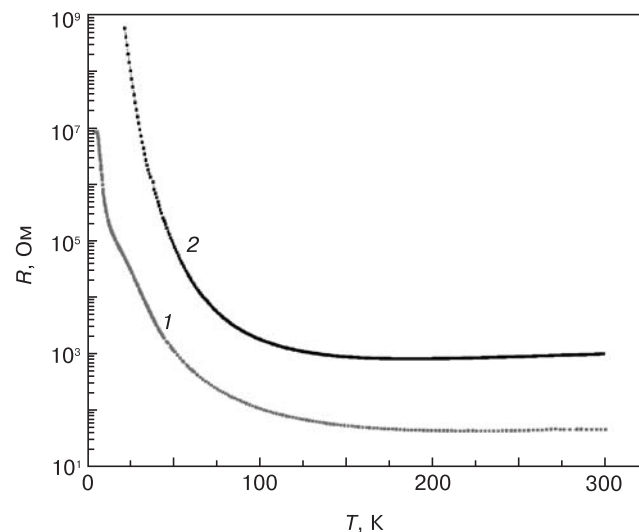


Рис. 5. Температурные зависимости электрического сопротивления НК $\text{Si}_{0.97}\text{Ge}_{0.03}$ с $\rho_{300\text{K}} = 0,025 \text{ Ом} \cdot \text{см}$ до (1) и после (2) облучения протонами с энергией 6 МэВ и дозой $\Phi = 1 \cdot 10^{17} \text{ p}^+/\text{см}^2$

Fig. 5. Dependence of the electrical resistivity of $\text{Si}_{0.97}\text{Ge}_{0.03}$ whiskers with $\rho_{300\text{K}} = 0.025 \text{ Ohm.cm}$ as a function of temperature (1) before and (2) after 6 MeV proton irradiation with a dose of $10^{17} \text{ p}^+/\text{cm}^2$

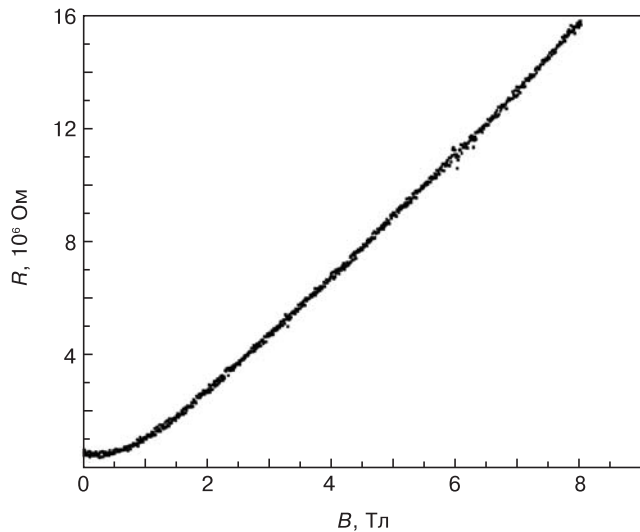


Рис. 6. Полевая зависимость магнетосопротивления НК $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$, облученных протонами дозой $1 \cdot 10^{17} \text{ p}^+/\text{cm}^2$ при температуре измерения 41 К

Fig. 6. Field dependence of the magnetoresistance of $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$ whiskers irradiated with $10^{17} \text{ p}^+/\text{cm}^2$ of protons measured at 41 K

ление заметно возрастает. Выясним природу такого поведения магнетосопротивления.

Известно, что для случая слабых магнитных полей существует полуклассическая аналитическая зависимость удельного сопротивления полупроводников от индукции магнитного поля [14] из которой следует, что эта зависимость возникает только в случае наличия в полупроводнике более одного типа свободных носителей заряда. Для того, чтобы выяснить подчиняются ли полученные авторами экспериментальные данные, показанные на рис. 6 и 7, этой модели, оценим концентрацию дырок и электронов в образцах при температурах измерения T , равных 41 и 89 К. При $T = 41 \text{ К}$, учитывая, что удельное сопротивление в отсутствие магнитного поля $\rho_0 = 90 \text{ Ом} \cdot \text{см}$, а подвижность дырок $\mu_p \approx 10^4 \text{ см}^2/(\text{В} \cdot \text{с})$

$$[13], \text{ получаем } p = \frac{1}{e\mu_p} \approx 10^{13} \text{ см}^{-3}.$$

Из зависимости собственной концентрации от температуры для кремния $\lg(np) = -3460 \frac{1}{T} + 21,5$ по-

лучаем, что при $T = 41 \text{ К}$ $n \approx 10^{-135} \text{ см}^{-3}$, т. е. свободные электроны практически отсутствуют. При $T = 89 \text{ К}$ $n \approx 10^{-48} \text{ см}^{-3}$, что обозначает то же самое. Таким образом, в образцах имеется только один тип свободных носителей заряда, что, согласно полуклассической модели магнетосопротивления, должно приводить к его отсутствию. Действительно, в полях до 0,6—0,8 Тл это так. Наличие магнетосопротивления в полях более 0,8 Тл требует объяснения за рамками указанной выше модели. Дело в том, что параметры свободных носителей тока, такие, как концентрация и подвижность, сами зависят от магнитного поля, а в сущности, уменьшаются с его возрастанием.

Определим, что приводит к возрастанию сопротивления с увеличением магнитного поля: уменьшение концентрации свободных носителей заряда (так называемое магнитное вымораживание) или уменьшение их подвижности?

Механизм магнитного вымораживания состоит в следующем. В магнитном поле как зона проводимости, так и валентная зона расщепляются на уровни Ландау. При этом дно зоны проводимости (нижний уровень Ландау) поднимается, а потолок валентной зоны снижается, расширяя запрещенную зону (рис. 8), возвращая часть электронов из зоны проводимости обратно в валентную зону или на донорный

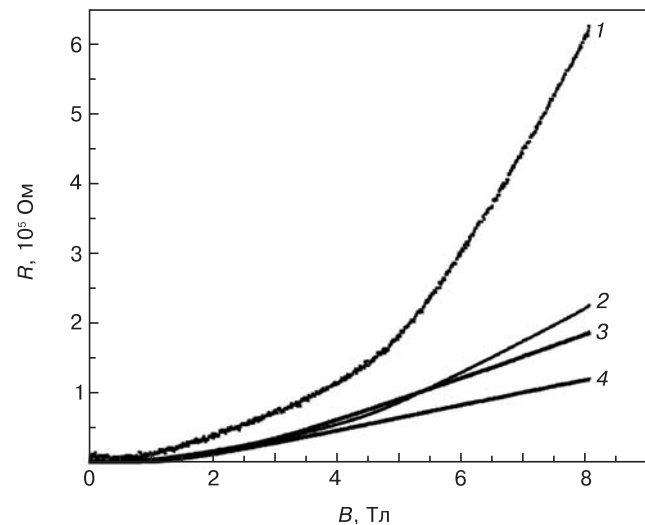


Рис. 7. Полевые зависимости магнетосопротивления НК $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$, облученных протонами дозой $1 \cdot 10^{17} \text{ p}^+/\text{cm}^2$, при различных температурах измерения T , К: 1 — 65; 2 — 75; 3 — 80; 4 — 89

Fig. 7. Field dependence of the magnetoresistance of $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$ whiskers irradiated with $10^{17} \text{ p}^+/\text{cm}^2$ of protons measured at T , К: (1) 65, (2) 75, (3) 80 and (4) 89

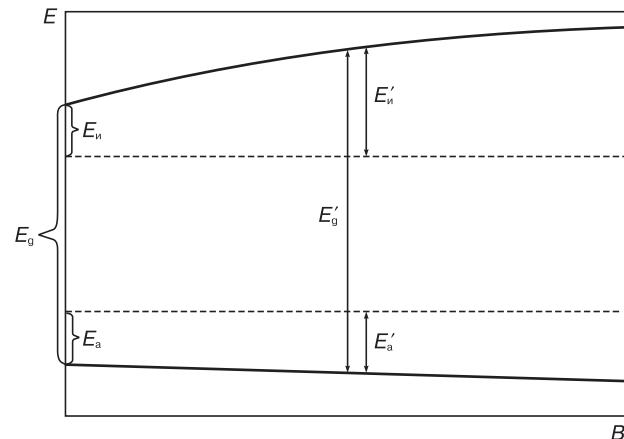


Рис. 8. Схематическая зависимость положения нижней зоны проводимости и верхнего уровня валентной зоны от магнитного поля в полупроводнике.

E_g, E_a, E_i — ширина запрещенной зоны, энергия активации акцептора и энергия ионизации донора соответственно. E'_g, E'_a, E'_i — те же величины в магнитном поле

Fig. 8. Schematic dependence of the band gap bottom and valence band top positions on magnetic field in a semiconductor.

E_g, E_a and E_i are band gaps, acceptor activation energy and donor ionization energy, respectively, and E'_g, E'_a and E'_i are the same parameters in a magnetic field

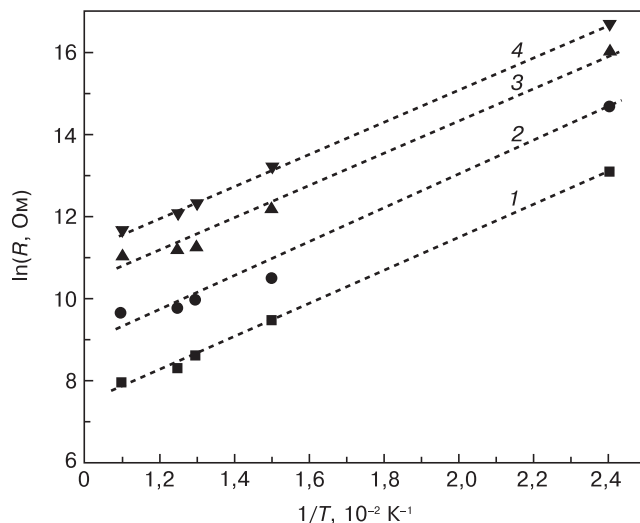


Рис. 9. Зависимости логарифма магнетосопротивления НК $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$, облученных протонами с дозой $1 \cdot 10^{17} \text{ p}^+/\text{cm}^2$, от обратной температуры в разных магнитных полях B , Тл: 1 — 0; 2 — 2; 3 — 5; 4 — 8

Fig. 9. Logarithmic magnetoresistance of $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$ whiskers irradiated with $10^{17} \text{ p}^+/\text{cm}^2$ of protons as a function of inverse temperature in different magnetic fields B , Tl: (1) 0, (2) 2, (3) 5 and (4) 8

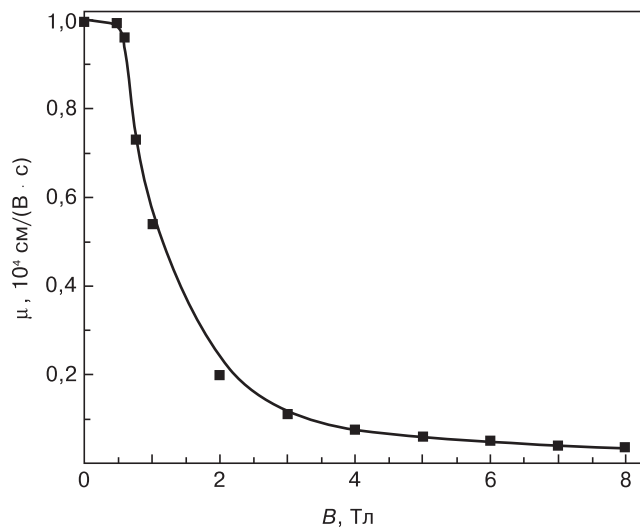


Рис. 10. Зависимость подвижности свободных носителей заряда (дырок) от магнитного поля в НК $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$, облученных протонами с дозой $1 \cdot 10^{17} \text{ p}^+/\text{cm}^2$

Fig. 10. Free carrier (hole) mobility as a function of magnetic field in $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$ whiskers irradiated with $10^{17} \text{ p}^+/\text{cm}^2$ of protons

уровень, а также из акцепторного уровня обратно в валентную зону. Таким образом, магнитное поле влияет так же как и понижение температуры: уменьшает концентрацию свободных носителей заряда и в зоне проводимости, и в валентной зоне.

Для выяснения влияния магнитного вымораживания вычислим энергию ионизации примесных атомов в разных магнитных полях. Оценка энергии ионизации по наклону прямой $\ln R = f(1/T)$ (рис. 9) дает значение 0,072 эВ. Согласно литературным данным, это может быть Ga (0,073 эВ) или Al (0,069 эВ), которые являются акцепторами в Si [14]. Из рис. 9 также видно, что энергия ионизации примеси практически не зависит от магнитного поля. Это значит,

что энергия примесного уровня практически не зависит от магнитного поля, что, в свою очередь, говорит о независимости концентрации дырок от магнитного поля.

Таким образом, существенное магнетосопротивление при всех исследованных температурах связано с магнитолевым уменьшением подвижности свободных носителей заряда (дырок) при увеличении магнитного поля (рис. 10). Концентрация дырок от магнитного поля практически не зависит. Это приводит к выводу, что расширение запрещенной зоны в магнитных полях до 8 Тл незначительно.

Заключение

Изучено влияние протонного облучения и сильных магнитных полей на магнетосопротивление НК $\text{Si}_{0,97}\text{Ge}_{0,03}$ в интервале температур 4,2—300 К. Обнаружено незначительное уменьшение электрического сопротивления кристаллов в температурной области 4,2—40 К в процессе облучения малыми дозами протонов и существенное увеличение электрического сопротивления во всей исследуемой температурной области при облучении дозой $1 \cdot 10^{17} \text{ p}^+/\text{cm}^2$. Рассчитана энергия ионизации примесных атомов в разных магнитных полях. Установлено, что энергия примесного уровня практически не зависит от магнитного поля, что в свою очередь, говорит о независимости концентрации дырок от магнитного поля. Показано, что существенное магнетосопротивление при всех исследованных температурах связано с магнитолевым уменьшением подвижности свободных носителей заряда (дырок). Установлено, что концентрация дырок практически не зависит от магнитного поля. Это приводит к выводу, что расширение запрещенной зоны в магнитных полях до 8 Тл незначительно.

Библиографический список

1. Гиваргизов, Е. И. Рост нитевидных и пластинчатых кристаллов из пара / Е. И. Гиваргизов. — М.: Наука, 1977. — 304 с.
2. Baitsar, R. Mechanical sensors based on Si-Ge whiskers / R. Baitsar, V. Voronin, E. Krasnogenov, N. Bogdanova // Sensors and Actuators. A. — 1992. — V. 30. — P. 175—181.
3. Voronin, V. Silicon whiskers for mechanical sensors / V. Voronin, I. Maryamova, Y. Zaganyach, E. Karetnikova, A. Kutrakov // Sensors and Actuators. A. — 1992. — V. 30. — P. 27—33.
4. Maryamova, I. Mechanical sensors for cryogenic temperatures / I. J. Maryamova, E. N. Karetnikova, I. D. Gortynskaya, Ju. S. Yatzuk / Int. Conf. Actual problems of electronics instrument engineering (APEIE-92). — Novosibirsk, 1992. — V. 4. — P. 96—99.
5. Maryamova, I. Low temperature semiconductor mechanical sensors / I. Maryamova, A. Druzhinin, E. Lavitska, I. Hortynska, Y. Yatzuk // Sensors and Actuators. A. — 2000. — V. 85. — P. 153—157.
6. Baitsar, R. I. Mechanical properties of silicon-germanium alloy whiskers / R. I. Baitsar, I. V. Kurylo, S. S. Varshava, I. P. Ostrovskii // Functional materials. — 2001. — V. 8, N 2. — P. 398—400.
7. Климовская, А. И. Рентгенометрическое исследование субмикронных нитевидных кристаллов кремния n-типа / А. И. Климовская, И. П. Островский, Р. И. Байцар // Изв. РАН. Сер. физ. — 1993. — Т. 57, № 11. — С. 210—213.
8. Gule, E. G. Visible light emission from free-standing filament crystals of silicon / E. G. Gule, G. Yu. Rudko, A. I. Klimovskaya, M. Ya. Valakh, I. P. Ostrovskii // Physica status solidi. — 1997. — V. 161. — P. 565—571.

9. Цмоць, В. М. Исследование и моделирование магнитной восприимчивости нитевидных кристаллов Si и $\text{Si}_{0,95}\text{Ge}_{0,05}$ / В. М. Цмоць, П. Г. Литовченко, Н. Т. Павловская, И. П. Островский, Ю. В. Павловский // ФТП. – 2010. – Т. 44, вып. 5. – С. 649–653.

10. Дружинин, А. А. Исследование влияния электронного облучения на кремниевые тензорезисторы / А. А. Дружинин, И. И. Марьямова, А. П. Кутраков, Н. С. Лях–Кагуй, В. Т. Маслюк, И. Г. Мегела // Технология и конструирование в электронной аппаратуре. – 2010. – № 1(85). – С. 26–29.

11. Дружинин, А. О. Влияние облучения γ -квантами на свойства нитевидных кристаллов Si–Ge / А. О. Дружинин,

И. П. Островский, Ю. Н. Ховерко, В. М. Цмоць, Ю. В. Павловский, Н. Т. Павловская, В. Ю. Поварчук // Физика и химия твердого тела. – 2010. – Т. 11, № 1. – С. 89–92.

12. Агринская, Н. В. Проявление E_2 -проводимости в магнито-сопротивлении многодолинных полупроводников / Н. В. Агринская // ФТП. – 1999. – Т. 33, № 2. – С. 161–169.

13. Киреев, П. С. Физика полупроводников / П. С. Киреев. – М.: Высш. школа, 1975. – 584 с.

14. Смит, Р. Полупроводники / Р. Смит. – М.: Мир, 1992. – 558 с.

Статья поступила в редакцию 28 января 2015 г.

ISSN 1609–3577 Izvestiya vuzov. Materialy elektronnoy tekhniki = Materials of Electronics Engineering. 2015, vol. 18, no. 1, pp. 69–74.

Magnetoresistance of Proton Irradiated $\text{Si}_{0,97}\text{Ge}_{0,03}$ Whiskers

Nadezhda Tarasovna Pavlovskaya¹ — Postgraduate Student (pavlovskyy@mail.ru); Petr Grigorevich Litovchenko¹ — Dr. Sci. (Phys.–Maht.), Professor, Head Department of Radiation Physics; Yuriy Orestovich Ugrin² — Cand. Sci. (Phys.–Maht.), Associate Professor; Yuriy Viktorovich Pavlovskiy² — Cand. Sci. (Phys.–Maht.), Associate Professor; Igor Petrovich Ostrovskii³ — Dr. Sci. (Eng.), Professor; Krzysztof Rogacki⁴ — Professor, Dr.

¹Institute for Nuclear Research National Academy of Sciences of Ukraine (NASU),

47 Prospekt Nauky, Kiev UA–03680, Ukraine

²Ivan Franko Drohobych State Pedagogical University,

34 I. Franko Str, Drohobych 82100, Ukraine

³Lviv Polytechnic National University,

12 Bandera str., Lviv 79013, Ukraine

⁴International Laboratory

of High Magnetic Fields and Low Temperatures,

95 Gajowicka str., Wroclaw 53–421, Poland

Abstract. Whiskers are a new material that is characterized by high structural perfection, chemical resistance and strength which reaches the theoretically possible limit for crystals of small transverse dimensions. The test whiskers were synthesized by the method of chemical transport reactions in a closed bromide system using gold as the initiator of growth. The crystals were irradiated by protons with an energy of 6 MeV and doses of $5 \cdot 10^{13}$, 10^{15} and $1 \cdot 10^{17}$ p⁺/cm² at 40 °C in a U–120 cyclotron.

The effects of proton irradiation and high magnetic fields on the magnetoresistance of $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$ ($x = 0,03$) whiskers in the 4,2–300 K temperature range has been studied. A slight decrease in the electrical resistance of the crystals in the 4,2–40 K temperature range during irradiation with small proton doses and a significant increase in their resistance in the entire investigated temperature range for a dose of $1 \cdot 10^{17}$ p⁺/cm² have been found. The ionization energy of the impurity atoms in different magnetic fields has been calculated. It has been revealed that the energy level of the impurity depends on the magnetic field but slightly which in turn indicates a independence of the concentration of holes on the magnetic field. It has been shown that a significant magnetoresistance at all studied temperatures was due to the magnetic field–caused decrease in the mobility of free charge carriers (holes). It has been found that the concentration of holes depends on magnetic field but a little. Conclusion has been made about a negligible expansion of the band gap in magnetic fields of up to 8 T.

Keywords: whiskers, silicon–germanium, proton irradiation, resistance, magnetic field, magnetoresistance, mobility.

References

1. Givargizov E. I. *Growth of whiskers and the plate-like of crystals from the vapour*. Moscow: Nauka, 1977. 304 p. (In Russ.)

2. Baitsar R., Voronin V., Krasnogenov E., Bogdanova N. Mechanical sensors based on Si–Ge whiskers. *Sensors and Actuators*. 1992, vol. A30, pp. 175–181.

3. Voronin V., Maryamova I., Zaganyach Y., Karetnikova E., Kutrakov A. Silicon whiskers for mechanical sensors. *Sensors and Actuators*. 1992, vol. A30, pp. 27–33.

4. Maryamova I. J., Karetnikova E. N., Gortynskaya I. D., Yatzuk Ju. S. *Mechanical sensors for cryogenic temperatures*. Int. Conf. Actual Problems of Electronics Instrument Enginiring (APEIE–92). Novosibirsk, 1992. Vol. 4, pp. 96–99.

5. Maryamova I., Druzhinin A., Lavitska E., Hortynska I., Yatzuk Y. Low temperature semiconductor mechanical sensors. *Sensors and Actuators*. 2000, vol. A85, pp. 153–157.

6. Baitsar R. I., Kurylo I. V., Varshava S. S., Ostrovskii I. P. Mechanical properties of silicon–germanium alloy whiskers. *Functional materials*. 2001, vol. 8, no. 2, pp. 398–400.

7. Klimovskaya A. I., Ostrovskii I. P., Baitsar R. I. Radiometric study of submicron whiskers of silicon *n*-type. *Bulletin of the Russian Academy of Sciences. Physics*. 1993, vol. 57, no. 11, pp. 210–213. (In Russ.)

8. Gule E. G., Rudko G. Yu., Klimovskaya A. I., Valakh M. Ya. and Ostrovskii I. P. Visible light emission from free-standing filament crystals of silicon. *Physica status solidi*. 1997, vol. 161, pp. 565–571.

9. Tsmots V. M., Litovchenko P. G., Pavloska N. T., Pavlovskyy Yu. V., Ostrovskyy I. P. Study and simulation of magnetic susceptibility of Si and $\text{Si}_{0,95}\text{Ge}_{0,05}$ whiskers. *Fizika i tekhnika poluprovodnikov = Semiconductors*. 2010, vol. 44, no. 5, pp. 649–653. (In Russ.)

10. Druzhinin A. A., Maryamova I. I., Kutrakov A. P., Lach-Kahuj N. S., Masluk V. T., Megela I. G. Investigation of the effect of electron irradiation on of silicon strain gages. *Technologija i konstruivovanie v elektronnoj apparature*. 2010, vol. 85, no. 1, pp. 26–29. (In Russ.)

11. Druzhinin A. A., Ostrovskii I. P., Khoverko Yu. M., Tsmots V. M., Pavlovskyy Yu. V., Pavloska N. T., Povarchuk V. Yu. Influence of γ -irradiation on Si–Ge whiskers properties. *Physics and chemistry of solid state*. 2010, vol. 11, no. 1, pp. 89–92. (In Russ.)

12. Agrinskaya N. V. Manifestation of E_2 -conductivity in the magneto resistance many-valley semiconductors. *Fizika i tekhnika poluprovodnikov = Semiconductors*. 1999, vol. 33, no. 2, pp. 161–169. (In Russ.)

13. Kireev P. S. *Physics of semiconductors*. Moscow: Vysshaya shkola, 1975. 584 p. (In Russ.)

14. Smith R. *Semiconductors*. Moscow: Mir, 1992. 558 p. (In Russ.)

Received January 28, 2015