

Д. т. н. А. А. ДРУЖИНИН, к. ф.-м. н. И. П. ОСТРОВСКИЙ,  
к. т. н. Ю. Н. ХОВЕРКО, д. ф.-м. н. П. Г. ЛИТОВЧЕНКО,  
Н. Т. ПАВЛОВСКАЯ, к. ф.-м. н. Ю. В. ПАВЛОВСКИЙ,  
д. ф.-м. н. В. М. ЦМОЦЬ, к. ф.-м. н. В. Ю. ПОВАРЧУК

Украина, НУ «Львовская политехника»;

Дрогобычский гос. педагогический ун-т имени Ивана Франко;  
г. Киев, Институт ядерных исследований НАНУ, Институт физики НАНУ  
E-mail: druzh@polynet.lviv.ua

Дата поступления в редакцию  
08.07 2010 г.

Оппонент к. ф.-м. н. И. М. КУПЧАК  
(ИФП им. В. Е. Лашкарёва, г. Киев)

## РАДИАЦИОННАЯ СТОЙКОСТЬ НИТЕВИДНЫХ КРИСТАЛЛОВ SiGe, ИСПОЛЬЗУЕМЫХ ДЛЯ СЕНСОРОВ ФИЗИЧЕСКИХ ВЕЛИЧИН

*Приведены результаты исследования влияния облучения  $\gamma$ -квантами дозами до  $1 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-2}$  и магнитного поля с индукцией до 14 Тл на электропроводность нитевидных кристаллов  $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$  в интервале температуры 4,2—300 К.*

Нитевидные кристаллы  $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$  (при  $x = 0,03$ ) с повышенной концентрацией примесей вблизи перехода «металл — изолятор» используют как чувствительные элементы сенсоров механических и тепловых величин [1, 2]. Важной научно-технической проблемой, которая не до конца решена, является создание сенсоров физических величин, работоспособных в сложных условиях эксплуатации (сильные магнитные поля, низкая температура, радиационное облучение). В [3, 4] приведены результаты исследования влияния сильных магнитных полей и облучения  $\gamma$ -квантами дозами до  $2 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-2}$  на электропроводность нитевидных кристаллов  $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$ . В этих работах анализируются физические механизмы возникновения радиационных дефектов и их влияние на электропроводность нитевидных кристаллов (НК). С практической точки зрения важным параметром является допустимая доза облучения, т. е. та, которая существенно не влияет на характеристики сенсоров. Поэтому целью настоящей работы было установление возможности создания радиационно стойких сенсоров, работоспособных в условиях сильных магнитных полей. Для этого исследовали влияние магнитного поля с индукцией до 14 Тл и излучения  $\gamma$ -квантов (излучение  $\text{Co}^{60}$  с дозами до  $1 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-2}$ ) на электропроводность нитевидных кристаллов  $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$  ( $x = 0,03$ ), у которых примеси накапливаются вблизи перехода «металл — изолятор», в интервале температуры 4,2—300 К.

Для исследований были выбраны НК  $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$  ( $x = 0,01—0,03$ ) с удельным сопротивлением  $\rho = 0,008—0,025 \text{ Ом} \cdot \text{см}$ , выращенные методом химических транспортных реакций в закрытой бромидной системе с использованием золота в качестве инициатора роста. Диаметр кристаллов находился в пределах  $40 \pm 2 \text{ мкм}$ , длина — 2—3 мм. Состав твердого раствора определялся методом микрозондового анализа на установке САМЕВАХ. Точность определения

молярной доли компонентов составляла 0,01—0,03%. Облучение образцов  $\gamma$ -квантами осуществлялось с помощью кобальтовой пушки (излучение  $\text{Co}^{60}$ ). После облучения образцов дозами  $\gamma$ -квантов  $6 \cdot 10^{16}$ ;  $2,6 \cdot 10^{17}$ ;  $4 \cdot 10^{17}$ ;  $1 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-2}$  определяли температурную зависимость их электропроводности в интервале температуры 4,2—300 К и низкотемпературное магнетосопротивление в полях до 12 Тл (в Международной лаборатории сильных магнитных полей и низких температур, г. Вроцлав, Польша).

Как видно из **рис. 1**, сопротивление кристаллов после облучения практически не изменяется во всем температурном интервале. На магнетосопротивление этих же образцов облучение влияет сильнее (**рис. 2**). Дозовая зависимость изменения сопротивления НК под воздействием облучения, приведенная на **рис. 3**, свидетельствует о том, что доза  $2,6 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-2}$  является допустимой для этих материалов при использовании их в качестве радиационно стойких сенсоров. Однако следует отметить, что такие сенсоры не могут использоваться при воздействии сильных магнитных полей, поскольку в облученных кристаллах наблюдается значительное изменение магнетосопротивления.

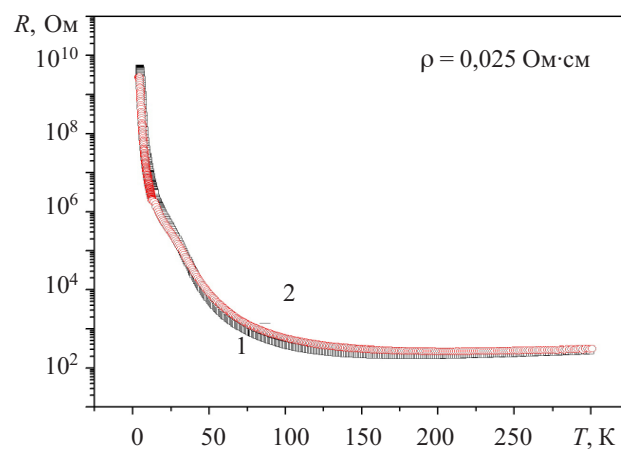


Рис. 1. Температурная зависимость сопротивления необлученных (1) и облученных (2)  $\gamma$ -квантами дозой  $2,6 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-2}$  НК  $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$ , закрепленных на медной подложке

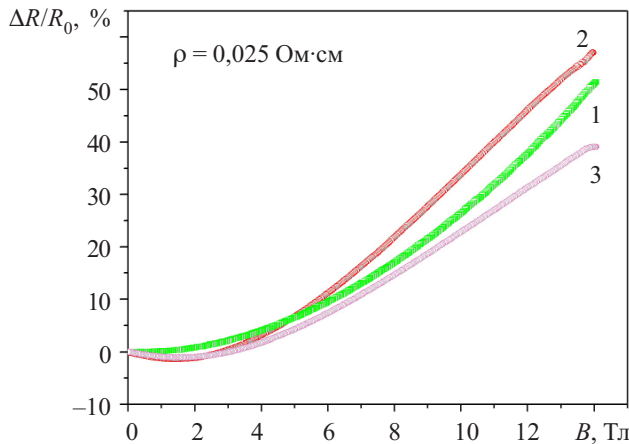


Рис. 2. Магнетосопротивление НК  $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$ , закрепленных на медной подложке, до (1) и после (2, 3) облучения  $\gamma$ -квантами при разных дозах: 2 —  $2,6 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-2}$ ; 3 —  $4 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-2}$

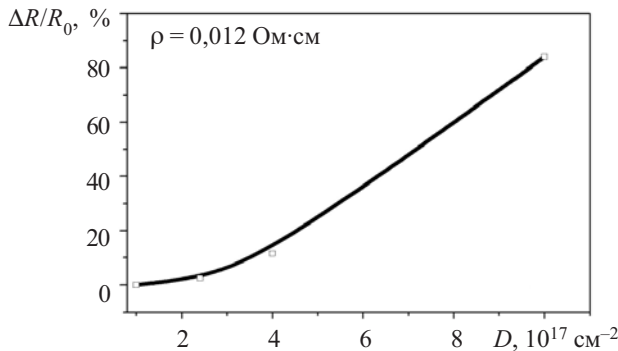


Рис. 3. Зависимость относительного изменения сопротивления НК  $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$  от дозы облучения  $D$   $\gamma$ -квантами

Также было исследовано влияние  $\gamma$ -облучения на характеристики чувствительных элементов сенсоров на основе НК. Так, на **рис. 4** приведена температурная зависимость сопротивления облученных разными дозами  $\gamma$ -квантов НК  $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$ , закрепленных на медной подложке. Как видно, при облучении дозой  $2,6 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-2}$  наблюдается существенное изменение сопротивления. Однако причиной этого является не изменение характеристик материала, а разрушение слоя клея, в результате чего кристалл отходит от подложки, т. е. становится свободным. Следовательно, такая доза выводит из строя сенсор. Поэтому для создания радиационно стойких сенсоров на основе НК  $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$  необходимо искать другое конструктивное решение закрепления чувствительного элемента.

У нитевидных кристаллов  $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$  при  $x = 0,01$  с уровнем легирования, соответствующим переходу «металл — диэлектрик» с диэлектрической стороны, и удельным сопротивлением  $\rho_{300\text{K}} = 0,018 \text{ Ом} \cdot \text{см}$ , был обнаружен гигантский пьезорезистивный эффект [5] (коэффициент тензочувствительности  $K = 3,5 \cdot 10^4$ ). На их основе были созданы тензорезисторы, работоспособные при температуре 4,2 К, с диапазоном измеряемой деформации в пределах  $\pm 1,26 \cdot 10^{-3}$  отн. ед. [6]. Такие сенсоры экстремально чувствительны, поскольку в области низких температур тензочувствительность НК  $p\text{-Si}_{1-x}\text{Ge}_x$  увеличивается более чем на по-

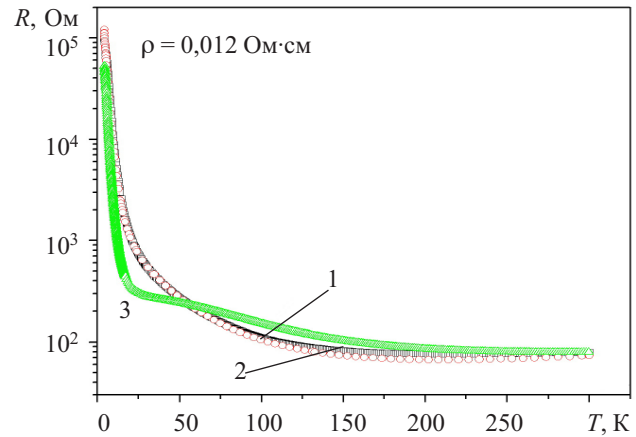


Рис. 4. Температурная зависимость сопротивления НК  $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$ , закрепленных на медной подложке, необлученных (1) и облученных (2, 3) различными дозами  $\gamma$ -квантов: 2 —  $0,6 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-2}$ ; 3 —  $2,6 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-2}$

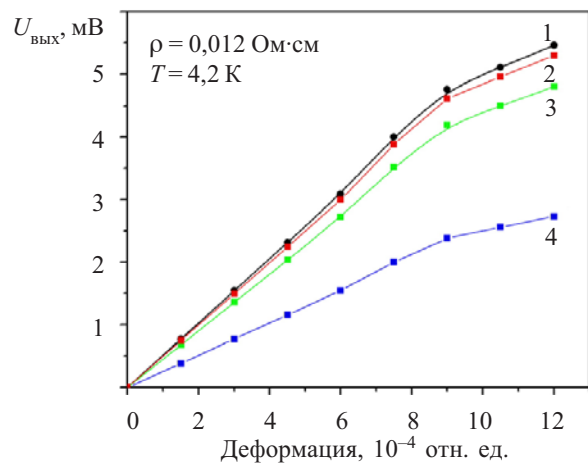


Рис. 5. Градуировочные характеристики необлученного (1) сенсора деформации на основе НК  $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$  и облученного (2—4) различными дозами  $\gamma$ -квантов: 2 —  $2,6 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-2}$ ; 3 —  $4 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-2}$ ; 4 —  $1 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-2}$

рядок по сравнению с сенсорами на основе сильнолегированных НК. Однако необходимо отметить, что поскольку существует достаточно сильная зависимость от температуры как коэффициента тензочувствительности, так и сопротивления сильнолегированных НК твердого раствора  $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$ , сенсоры деформации на их основе целесообразно использовать, в основном, при фиксированной температуре (например, при 4,2 К). На **рис. 5** приведена градуировочная характеристика такого тензорезистора при температуре 4,2 К и токе питания 5 мА (кривая 1). Точность измерения деформации таким сенсором достигает  $\pm 5 \cdot 10^{-6}$  отн. ед. Вместе с тем, градуировочная характеристика сенсоров деформации изменяется в зависимости от дозы облучения (кривые 2—4).

\*\*\*

Полученные результаты свидетельствуют о том, что НК твердого раствора  $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$  можно использовать для создания радиационно стойких высокочувствительных сенсоров деформации, работоспособных в сложных условиях эксплуатации (допустимая доза

облучения  $\gamma$ -квантами —  $2 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-2}$ , магнитное поле с индукцией до 4 Тл).

Показано, что НК с удельным сопротивлением  $\rho_{300\text{K}} = 0,018 \text{ Ом}\cdot\text{см}$  обеспечивают высокую точность измерения деформации ( $\pm 5 \cdot 10^{-6}$  отн. ед.) при температуре 4,2 К.

#### ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ

1. Дружинин А. О., Островський І. П., Когут Ю. Р. Ниткоподібні кристали кремнію, германію та їх твердих розчинів у сенсорній електроніці. — Львів: НУ «Львівська політехніка», 2010. [Druzhinin A. O., Ostrovs'kii I. P., Kogut Yu. R. Nitkopodibni kristali kremniyu, germaniyu ta yikh tverdikh rozchiniv u sensornii elektronitsi. L'viv. NU «L'viv's'ka politehnika». 2010]
2. Деклар. пат. на корисну модель 4531. Сенсор температури / А. О. Дружинин, І. П. Островський, Н. С. Лях, С. М. Матвієнко. — 2005. — Бюл. № 1. [Deklar. pat. na korisnu model' 4531. / А. О. Дружинин, І. П. Островський, Н. С. Лях, С. М. Матвієнко. 2005. Bull. 1]

3. Дружинин А. О., Островський І. П., Ховерко Ю. М. та ін. Вплив опромінення g-квантами на властивості ниткоподібних кристалів Si-Ge // Фізика і хімія твердого тіла. — 2010. — Т. 11, № 1. — С. 89—92. [Druzhinin A. O., Ostrovs'kii I. P., Khoverko Yu. M. ta in. // Fizika i khimiya tverdogo tila. 2010. Vol. 11, N 1. P. 89]
4. Дружинин А. О., Мар'ямова І. Й., Островський І. П. та ін. Вплив радіаційного опромінення на стрибкову провідність ниткоподібних кристалів Si та Si-Ge // Тези доп. IV Укр. наук. конф. з фізики напівпровідників. — Україна, м. Запоріжжя, 2009. — Т. 1. — С. 192—193. [Druzhinin A. O., Mar'yamova I. I., Ostrovs'kii I. P. ta in. // Tezi dop. IV Ukr. nauk. konf. z fiziki napivprovodnikiv. Ukraine, Zaporizhzhya, 2009. Vol. 1. P. 192]
5. Шкловський Б. И., Эфрос А. А. Электронные свойства легированных полупроводников. — М.: Наука, 1997. [Shklovskii B. I., Efros A. A. Elektronnye svoystva legirovannykh poluprovodnikov. M. Nauka. 1997]
6. Druzhinin A., Ostrovskiy I., Lavitska E. et al. Studies of piezoresistance in Si-Ge whiskers at cryogenic temperatures // Proc. SPIE. — 2003. — Vol. 5136. — P. 243—248.

Ю. В. УШЕНИН, к. ф.-м. н. А. В. САМОЙЛОВ, Р. В. ХРИСТОСЕНКО

Украина г. Киев, Институт физики полупроводников  
им. В. Е. Лашкарева НАНУ  
E-mail: samoylovanton@mail.ru

Дата поступления в редакцию  
06.10 2010 г.

Оппонент д. ф.-м. н. А. А. ЗАХАРЧЕНКО  
(ХФТИ, г. Харьков)

## УВЕЛИЧЕНИЕ ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТИ СЕНСОРОВ ИЗМЕНЕНИЯ ПОКАЗАТЕЛЯ ПРЕЛОМЛЕНИЯ СРЕДЫ НА ОСНОВЕ ПОВЕРХНОСТНОГО ПЛАЗМОННОГО РЕЗОНАНСА

*Показано, что использование инфракрасного источника излучения позволяет улучшить чувствительность сенсора по сравнению с источником видимого света.*

Поверхностный плазмонный резонанс (ППР) заключается в оптическом возбуждении плазмонов (или волнообразного изменения плотности заряда) в поверхности, разделяющей проводник (например, серебро или золото) и диэлектрик (это может быть газ, жидкость или твердое тело). Резонансный волновой вектор, связанный с оптическим возбуждением поверхностных плазмонов, зависит от комплексного показателя преломления металла и окружающей диэлектрической среды. Этот рефрактометрический метод с успехом использовался для анализа разнообразных веществ, будь то газы (например, ароматические углеводороды) [1], жидкости (например, токсины в жидкой среде) [2] или твердые тела (например, неорганические твердые частицы [3] и органические пленки Langmuir-Blodgett [4]).

Основным преимуществом поверхностного плазмонного резонанса является то, что он позволяет наблюдать изменения комплексного показателя преломления, которые происходят вблизи поверхности сенсора. То есть, любое физическое явление на поверхности, которое приводит к изменению показателя преломления, может быть использовано для получения отклика измерительной системы.

Для регистрации эффекта ППР используют различные принципы: запись интенсивности отраженного света на полувывсоте минимума ППР-кривой [5]; применение конвергирующего светового пучка и координатно-чувствительного регистратора [6]; механическое сканирование угла падения [7], при котором применяют как монохроматический лазерный источник излучения, так и источники немонохроматического излучения [8].

Появление новых модификаций приборов [9] свидетельствует об актуальности направления и наличии достаточно большого количества нерешенных задач, требующих непрерывной модернизации сенсоров такого типа и приспособления их к изменяющимся требованиям к чувствительности, точности измерения, воспроизводимости результатов.

В настоящей работе рассматривается один из возможных способов улучшения чувствительности ППР-преобразователей к изменению показателя преломления исследуемой среды, основанный на применении длинноволновых источников возбуждения ППР.

### Анализ возможности увеличения чувствительности к изменению показателя преломления внешней среды

Основными объектами анализа в настоящей работе служат приборы серии ПЛАЗМОН [10, 11], которые являются универсальными при регистрации ППР в тех случаях, когда в качестве диэлектрика используют жидкости и газы. В них в качестве источника света используется лазерный светоизлучающий диод