

Д. т. н. А. А. ДРУЖИНИН, к. т. н. И. И. МАРЬЯМОВА,
А. П. КУТРАКОВ, к. т. н. Н. С. ЛЯХ-КАГУЙ,
д. ф.-м. н. В. Т. МАСЛЮК, И. Г. МЕГЕЛА

Украина, г. Львов, Национальный университет «Львовская политехника»;
г. Ужгород, Институт электронной физики НАНУ
E-mail: druzh@polynet.lviv.ua

Дата поступления в редакцию
02.06 2009 г.

Оппонент д. ф.-м. н. С. И. КОЗЛОВСКИЙ
(ИФП им. В. Е. Лашкарёва, г. Киев)

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ЭЛЕКТРОННОГО ОБЛУЧЕНИЯ НА КРЕМНИЕВЫЕ ТЕНЗОРЕЗИСТОРЫ

Исследовано влияние облучения различными дозами электронов с энергий до 14 МэВ на характеристики полупроводниковых тензорезисторов на основе нитевидных кристаллов кремния р-типа в различных температурных диапазонах.

Необходимость создания радиационно стойких сенсоров для измерения механических величин (деформации, давления и др.) обусловлена потребностями ряда областей науки и техники. В связи с этим представляет интерес исследование влияния электронного облучения на характеристики полупроводниковых тензорезисторов на основе кремния. Следует отметить, что изучение влияния облучения на свойства полупроводников, в частности на кремний, проводилось, в основном, на высокоомном материале. Лишь недавно появились исследования [1, 2], выполненные на сильнолегированном кремнии, однако в них основное внимание было уделено образованию радиационных дефектов в кремнии и их влиянию на электрофизические параметры (электропроводность, концентрация носителей и др.). Отсутствие данных о влиянии электронного облучения на тензорезистивные характеристики кремния, которые являются основными для тензорезисторов, говорит об актуальности исследования радиационной стойкости кремниевых тензорезисторов.

В качестве объекта исследования использовались тензорезисторы на основе нитевидных кристаллов (НК) кремния [3], легированного бором, которые обладают высокой степенью структурного совершенства, что способствует повышению их радиационной стойкости.

Диапазон значений удельного сопротивления исследованных тензорезисторов составляет 0,006—0,030 Ом·см. Измерение параметров производилось в области температур от –196 до +100°С и от –269 до +20°С.

Облучение тензорезисторов электронами высоких энергий проводилось на импульсном ускорителе электронов типа микротрон М-30 (рис. 1) в Институте электронной физики. Тензорезисторы облучались электронами с энергией 4,2—14 МэВ дозами $\Phi=5 \cdot 10^{16}$ — $1,25 \cdot 10^{18}$ эл/см² при средней плотности тока 10 мкА/см² и скважности 2000. Для проведения эксперимента тензорезисторы размещались в контейнере, который устанавливался в фокусе электронного пучка, а чтобы избежать радиационного нагрева во время облучения, осуществлялся их обдув парами жидкого азота.

Дефекты, образующиеся в кремнии при облучении электронами высоких энергий, весьма разнообразны и имеют различную температуру отжига [4, 5]. В наших исследованиях использовались тензорезисторы, которые после облучения подвергались изотер-

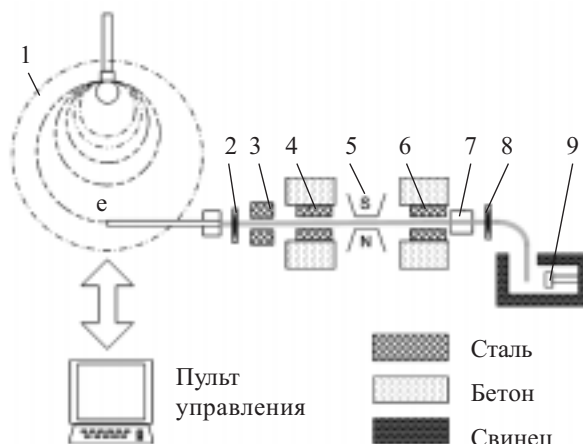
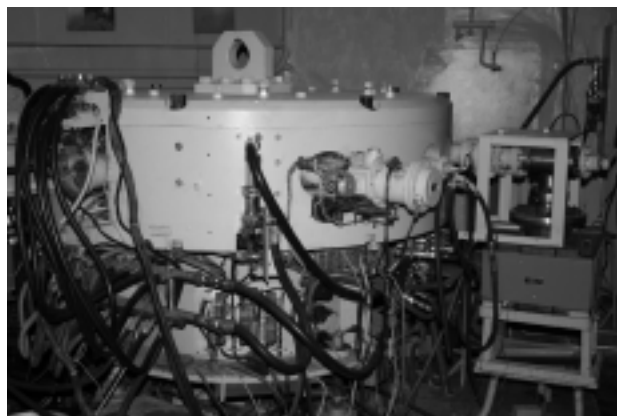


Рис. 1. Внешний вид и схема импульсного ускорителя электронов типа микротрон М-30:
1 — микротрон; 2 — тормозная мишень; 3, 4, 6 — система коллиматоров; 5 — магнит; 7 — проходная камера; 8 — исследуемые образцы; 9 — детектор

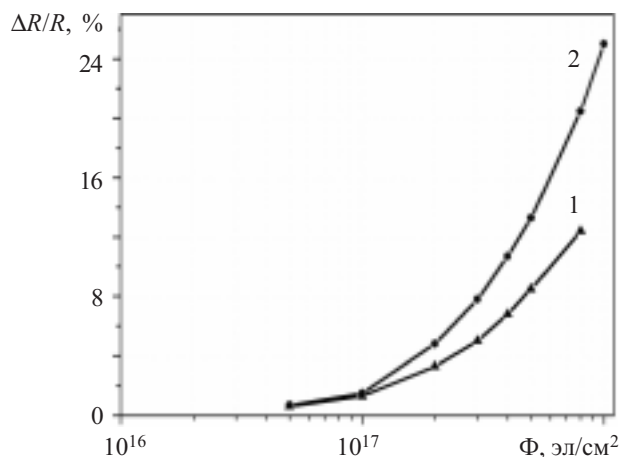


Рис. 2. Зависимость относительного изменения сопротивления кремниевых тензорезисторов от дозы облучения электронами с энергией 4,2 МэВ (1) и 14 МэВ (2) ($\rho_{300K}=0,01-0,02$ Ом·см)

мическому отжигу при температуре 120°C в течение двух часов для закрепления радиационных дефектов в кремнии.

Вначале исследовалось влияние энергии и дозы электронов на сопротивление тензорезисторов при комнатной температуре. Как видно из приведенных на рис. 2 графиков, большее влияние на номинальное сопротивление тензорезисторов при комнатной температуре оказывает интегральная доза поглощенных электронов, чем их энергия. При дозах до $1 \cdot 10^{17}$ эл/см² изменение сопротивления не превышает 1%, более значительные изменения сопротивления наблюдаются при $\Phi \geq 2 \cdot 10^{17}$ эл/см².

В диапазоне температур $-196 \dots +100^\circ\text{C}$ измерялись температурная зависимость сопротивления, деформационные характеристики, коэффициент тензочувствительности и температурная зависимость коэффициента тензочувствительности тензорезисторов до и после облучения.

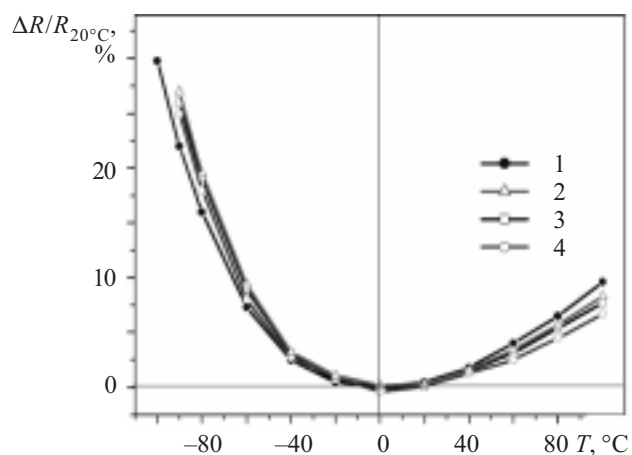


Рис. 3. Температурные зависимости относительного изменения сопротивления кремниевых тензорезисторов до (1) и после (2—4) облучения электронами с энергией 4,2 МэВ разными дозами: 2 — $5 \cdot 10^{16}$; 3 — $4 \cdot 10^{17}$; 4 — $8 \cdot 10^{17}$ эл/см² ($\rho_{300K}=0,01-0,02$ Ом·см)

Из представленных на рис. 3 данных видно, что в области отрицательных температур температурная зависимость изменения сопротивления кремниевых тензорезисторов после облучения их электронами с энергией 4,2 МэВ при дозах $\Phi \leq 8 \cdot 10^{17}$ эл/см² практически не изменяется. Значительное уменьшение температурного коэффициента сопротивления (ТКС) после облучения наблюдается в интервале температур 40—100°C, а при $\Phi = 8 \cdot 10^{17}$ эл/см² и $T = 100^\circ\text{C}$ ТКС уменьшается почти на 40%.

При увеличении энергии электронов до 10 МэВ и дозы до $1,25 \cdot 10^{18}$ эл/см² зависимость сопротивления облученных тензорезисторов от T в области низких температур сильно возрастает (рис. 4), соответственно увеличивается и их ТКС. При $T > 0^\circ\text{C}$ температурная зависимость сопротивления тензорезисторов значительно уменьшается после облучения, как и в случае облучения электронами с энергией 4,2 МэВ. При этом ТКС уменьшается почти в два раза, что весьма существенно для применения полупроводниковых тензорезисторов.

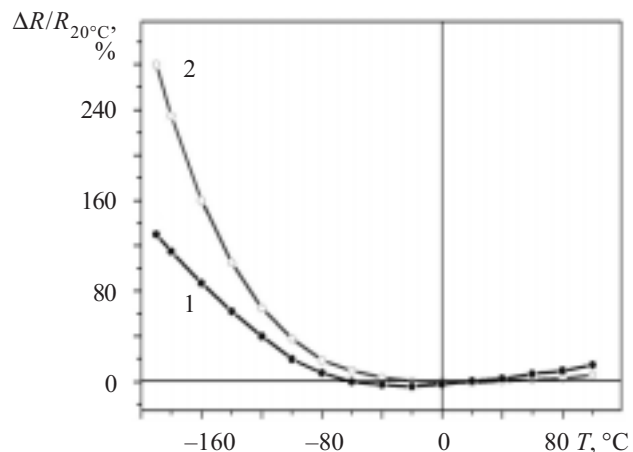


Рис. 4. Температурная зависимость относительного изменения сопротивления кремниевых тензорезисторов до (1) и после (2) облучения электронами с энергией 10 МэВ дозой $1,25 \cdot 10^{18}$ эл/см² ($\rho_{300K}=0,01-0,02$ Ом·см)

Деформационные характеристики кремниевых тензорезисторов до и после облучения исследовались в диапазоне деформаций $\epsilon = \pm 1,3 \cdot 10^{-3}$ отн. ед. в различных температурных диапазонах при разных энергиях и дозах электронов.

Для измерения зависимости относительного изменения сопротивления тензорезисторов от деформации растяжения тензорезисторы наклеивались на градуировочные балки лаком ВЛ-931 с температурой полимеризации 180°C. Полученные результаты показали, что при температурах +20 и +100°C после облучения тензорезисторов электронами с энергией 4,2 МэВ дозой $4 \cdot 10^{17}$ эл/см² коэффициент тензочувствительности практически не изменился (рис. 5).

Исследование влияния облучения на деформационные характеристики тензорезисторов в широком температурном диапазоне ($-196 \dots +100^\circ\text{C}$) проводилось на установке, смонтированной на базе гелиевого криостата КГ-100. Облученные и необлученные

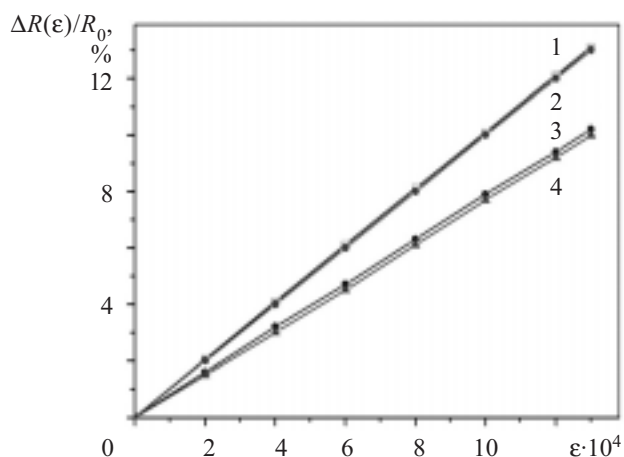


Рис. 5. Деформационная зависимость относительного изменения сопротивления тензорезисторов до (1, 3) и после (2, 4) облучения электронами с энергией 4,2 МэВ дозой $4 \cdot 10^{17}$ эл/см² при температуре 20°C (1, 2) и 100°C (3, 4)

тензорезисторы, взятые из одной партии, приклеивались на балку, изготовленную из сплава инвар с коэффициентом термического расширения (КТР), близким к КТР кремния при низких температурах, и подвергались деформации растяжения или сжатия при фиксированных температурах из указанного диапазона. На основании экспериментальных зависимостей относительного изменения сопротивления тензорезисторов от деформации $\Delta R(\epsilon)/R_0 = f(\epsilon)$ при различных температурах рассчитывали коэффициент тензочувствительности и его температурную зависимость при определенном уровне деформации. Как видно из приведенных на рис. 6 и 7 графиков, облучение тензорезисторов электронами с энергией 10 МэВ дозой $1,25 \cdot 10^{18}$ эл/см² приводит к изменению коэффициента тензочувствительности и практически не влияет на его температурную зависимость в области температур $-196 \dots +100^\circ\text{C}$. Это является весьма существен-

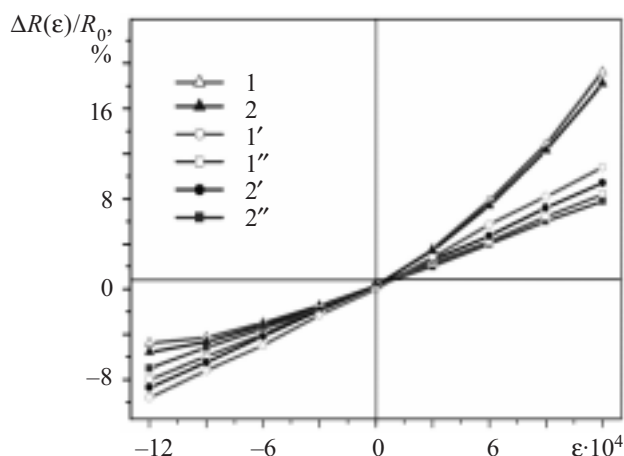


Рис. 6. Деформационные характеристики кремниевых тензорезисторов, облученных (1) электронами с энергией 10 МэВ дозой $1,25 \cdot 10^{18}$ эл/см² и необлученных (2), при температуре -196°C (1, 2); $+20^\circ\text{C}$ (1', 2'); $+100^\circ\text{C}$ (1'', 2'') ($\rho_{300\text{K}} = 0,01 - 0,03$ Ом·см)

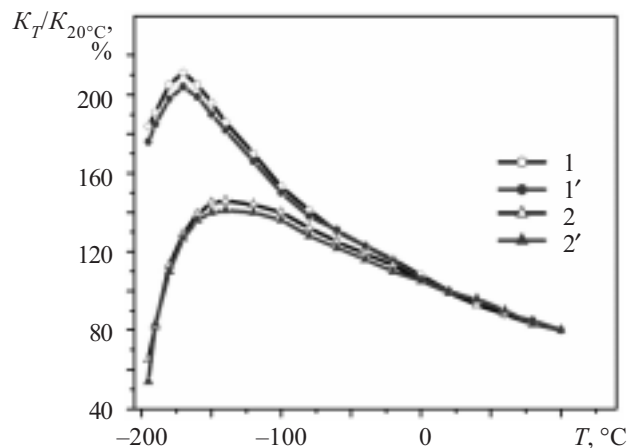


Рис. 7. Температурная зависимость коэффициента тензочувствительности кремниевых тензорезисторов, облученных (1, 2) электронами с энергией 10 МэВ дозой $1,25 \cdot 10^{18}$ эл/см² и необлученных (1', 2'): 1, 1' — при деформации растяжения $\epsilon = 1,2 \cdot 10^{-3}$ отн. ед.; 2, 2' — при деформации сжатия $\epsilon = -1,2 \cdot 10^{-3}$ отн. ед. ($\rho_{300\text{K}} = 0,01 - 0,03$ Ом·см)

ным как с точки зрения влияния радиационных дефектов и комплексов на деформационные процессы в сильнолегированном кремнии *p*-типа, так и для оценки радиационной стойкости и работоспособности кремниевых тензорезисторов после воздействия электронного облучения.

Проводилось также исследование влияния облучения электронами высоких энергий на характеристики тензорезисторов при криогенных температурах, вплоть до температуры жидкого гелия. В качестве чувствительных элементов этих тензорезисторов используются НК кремния, легированного бором с концентрацией, соответствующей области перехода «ме-

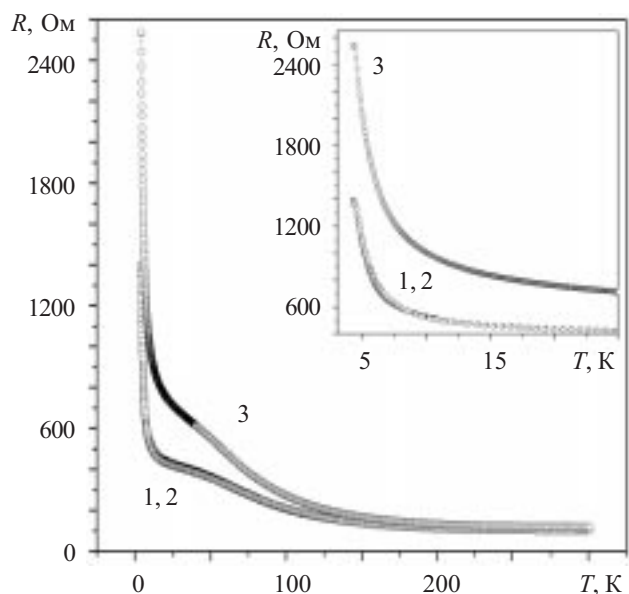


Рис. 8. Температурная зависимость сопротивления тензорезистора на основе НК кремния до (1) и после облучения электронами с энергией 10 МэВ дозами $1 \cdot 10^{17}$ эл/см² (2) и $1 \cdot 10^{18}$ эл/см² (3) ($\rho_{300\text{K}} = 0,0114$ Ом·см)

талл—диэлектрик» [6]. Как видно из **рис. 8**, облучение тензорезистора с $\rho_{300\text{K}}=0,0114$ Ом·см электронами с энергией 10 МэВ дозой $1 \cdot 10^{17}$ эл/см² не приводит к изменению его сопротивления в диапазоне температур от $-296 \dots +20^\circ\text{C}$ (4,2—300 К). Удельное сопротивление всех исследованных тензорезисторов лежало в диапазоне 0,006—0,016 Ом·см. После облучения их потоком электронов с указанными параметрами изменение их сопротивления при температуре жидкого гелия (4,2 К) не превышало 1,5—2%. Увеличение дозы облучения до $1 \cdot 10^{18}$ эл/см² при той же энергии электронов привело к значительным изменениям сопротивления и коэффициента тензочувствительности при гелиевых температурах. Полученные результаты хорошо согласуются с данными, приведенными в [2].

Изменение сопротивления кремниевых тензорезисторов после облучения в области температур 4,2—300 К можно объяснить, согласно концепции [2], изменением концентрации носителей тока в вырожденном кремнии *p*-типа, связанной с удалением носителей при образовании первичных радиационных дефектов — пар Френкеля.

Таким образом, исследования показали следующее.

1. При облучении электронами высоких энергий ($E=4,2\text{—}14$ МэВ) и дозах $\Phi \leq 1 \cdot 10^{17}$ эл/см² сопротивление Si-тензорезисторов при комнатной температуре практически не изменяется.

2. На сопротивление тензорезисторов большее влияние оказывает интегральная доза поглощенных электронов, чем их энергия.

3. Температурная зависимость сопротивления тензорезисторов после облучения потоком электронов с $E=4,2$ МэВ при $\Phi \leq 8 \cdot 10^{17}$ эл/см² практически не меняется в области отрицательных температур и значительно снижается в интервале температур 20—100°C. При увеличении энергии до 10 МэВ и дозы электро-

нов до $1,25 \cdot 10^{18}$ эл/см² температурная зависимость сопротивления облученных тензорезисторов сильно возрастает в области температур от -196 до 0°C .

4. Облучение тензорезисторов потоком электронов с $E=4,2$ МэВ и $\Phi=4 \cdot 10^{17}$ эл/см² не приводит к изменению деформационных характеристик тензорезисторов и коэффициента тензочувствительности в диапазоне температур 20—100°C. После облучения при $E=10$ МэВ и $\Phi=1 \cdot 10^{18}$ эл/см² в области температур от -196 до $+100^\circ\text{C}$ наблюдается небольшое изменение коэффициента тензочувствительности тензорезисторов, в то время как температурный коэффициент тензочувствительности практически не изменяется.

5. Исследованные тензорезисторы могут использоваться для работы в области криогенных температур, вплоть до температуры жидкого гелия, в условиях облучения электронами с энергией $E \leq 10$ МэВ и дозой $1 \cdot 10^{17}$ эл/см².

ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ

1. Emtsev V. V., Ehrhart P., Poloskin D. S., Dedek U. Electron irradiation of heavily doped silicon: group-III impurity ion pairs // *Physica B: Condensed Matter*.— 1999.— Vol. 273—274.— P. 287—290.

2. Emtsev V. V., Ehrhart P., Poloskin D. S., Emtsev K. V. Comparative studies of defect production in heavily doped silicon under fast electron irradiation at different temperatures // *J. Mater.Sci.: Mater Electron*.— 2007.— Vol. 18.— P. 711—714

3. Дружинин А. А., Марьямова И. И., Лавитская Е. Н. и др. От полупроводниковых тензорезисторов к микроэлектронным датчикам // *Датчики и системы*.— 2001.— № 6.— С. 2—7.

4. Баранський П. І., Федосов А. В., Гайдар Г. П. Неоднорідності напівпровідників і актуальні задачі міждефектної взаємодії в радіаційній фізиці і нанотехнології.— Київ—Луцьк: Вид-во Луцького ДТУ, 2006.

5. Пагава Т. А. Особенности отжига радиационных дефектов в облученных кристаллах *p*-Si // *ФТП*.— 2007.— Т. 41, Вып. 6.— С. 651—653.

6. Дружинин А. А., Марьямова И. И., Кутраков А. П., Павловский И. В. Тензорезисторы для низких температур на основе нитридных кристаллов кремния // *Технология и конструирование в электронной аппаратуре*.— 2008.— № 4.— С. 26—30.

НОВЫЕ КНИГИ

НОВЫЕ КНИГИ

Фудзисава Ю. 32-битные микропроцессоры и микроконтроллеры SuperH.— М.: Додека-21, 2009.— 360 с.

В книге описывается семейство SuperH — группа встраиваемых процессоров с оригинальной RISC-архитектурой, ориентированных на использование как в качестве микроконтроллеров (SH-1/SH-2), так и микропроцессоров (SH-3/SH-4), причем основное внимание уделяется последним. Описывается архитектура процессоров, приводятся примеры программ, задействующих различные их узлы, а также даются описания программных средств и примеры их использования при проектировании устройств на базе SuperH. Рассмотрены принципы работы MMU, кэш-памяти SDRAM и то, как они влияют на производительность системы.

Предназначена для инженеров-разработчиков, будет полезна студентам соответствующих специальностей, а также широкому кругу читателей, которые хотят узнать о микропроцессорах семейства SuperH.

