

К. т. н. Ю. Н. ХОВЕРКО

Украина, Национальный университет «Львовская политехника»,
Польша, г. Вроцлав, Международная лаборатория сильных
магнитных полей и низких температур
E-mail: druzh@polynet.lviv.ua

Дата поступления в редакцию
25.05 2010 г.

Оппонент к. т. н. П. В. ПАЩЕНКО
(НИИ ЯФ, г. Москва)

ИССЛЕДОВАНИЕ СТОЙКОСТИ СЛОЕВ ПОЛИКРЕМНИЯ В КНИ-СТРУКТУРАХ ПРИ ВОЗДЕЙСТВИИ ЭЛЕКТРОННОГО ОБЛУЧЕНИЯ И СИЛЬНОГО МАГНИТНОГО ПОЛЯ

Исследованы свойства рекристаллизованных слоев поликремния на изоляторе p -типа проводимости, облученных высокоэнергетическими электронами, в температурном диапазоне 4,2—300 К и в сильном магнитном поле с целью создания датчиков физических величин, работоспособных в жестких условиях эксплуатации.

Проблема создания микроэлектронных датчиков механических и тепловых величин, работоспособных в экстремальных условиях, т. е. при низкой температуре, в сильном магнитном поле, а также в условиях электронного облучения, является актуальной для различных отраслей науки и техники (авиакосмическая техника, криоэнергетика и др.).

Сегодня в микроэлектронике широко используются слои поликристаллического кремния на поверхности окисленной кремниевой пластины (КНИ-структуры). Такие слои формируются, как правило, химическим осаждением из газовой фазы. В отличие от монокристаллического кремния, в поликристаллических слоях подвижность электронов и дырок мала, что обусловлено наличием большого количества дефектов структуры, которые являются центрами рассеяния и рекомбинации [1, 2]. Уменьшение количества дефектов структуры при лазерной рекристаллизации исходного поликремния ведет к возрастанию подвижности носителей заряда в слое, что делает возможным создание на основе КНИ-структур микроэлектронных приборов, в том числе датчиков физических величин с большим быстродействием, увеличенной степенью интеграции, а также создание интегральных схем с трехмерной интеграцией элементов для обработки сигналов в интеллектуальных датчиках [2, 3].

Известны микроэлектронные датчики механических и тепловых величин на основе поликремния для диапазона температуры $-30...+60^{\circ}\text{C}$ [3, 4]. Наши предыдущие исследования [5—8] показали возможность создания датчиков механических и тепловых величин на основе рекристаллизованных лазером слоев поликремния на изоляторе, работоспособных в широком интервале температуры (4,2—300 К). Для того, чтобы оценить радиационную стойкость таких датчиков, необходимо провести при криогенных темпера-

турах исследование характеристик слоев поликристаллического кремния с различной концентрацией носителей, облученных высокоэнергетическими электронами, а также оценить влияние магнитного поля на эти характеристики.

Целью настоящей работы является изучение возможности использования КНИ-структур в датчиках физических величин, работоспособных в жестких условиях эксплуатации — при низких температурах, в сильном магнитном поле и при облучении.

Объект исследования и методика эксперимента

Для исследования характеристик слоев поликремния использовались специально изготовленные тестовые КНИ-структуры с поликремниевыми резисторами размерами $80 \times 8 \times 0,5$ мкм (рис. 1), рекристаллизованными лазером. В качестве исходного материала использовали пластины кремния ориентации (100), p -типа проводимости, предварительно термически окисленные до получения слоя оксида толщиной 1,0 мкм. На слой SiO_2 в реакторе с рабочим давлением порядка 100 Па при температуре 625°C из газовой фазы охлаждали слой поликристаллического кремния толщиной 0,5 мкм. Затем осуществлялось легирование поликремния методом ионной имплантации бора с различными дозами. Слои поликремния подвергали лазерной рекристаллизации путем сканирования поверхности лазерным лучом ($\lambda=1,06$ мкм). После рекристаллизации концентрация носителей за-

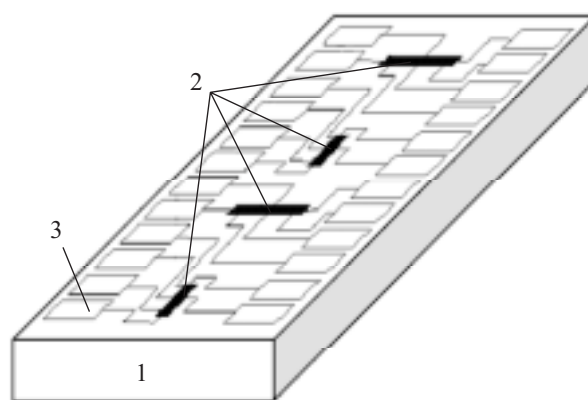


Рис. 1. Схематическое изображение образца тестовой КНИ-структуры:

1 — подложка из монокристаллического кремния; 2 — поликремниевые резисторы; 3 — контактные площадки

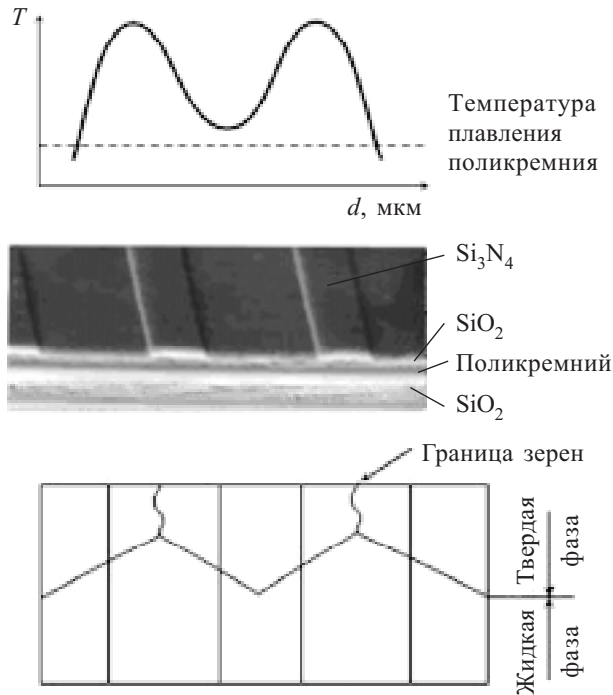


Рис. 2. Модуляция температурного профиля в зоне расплава во время процесса рекристаллизации поликремниевый слой на изоляторе

ряда в поликремниевых резисторах составила $4,8 \cdot 10^{18}$ и $1,7 \cdot 10^{20} \text{ см}^{-3}$.

При лазерной рекристаллизации использовалось комбинированное покрытие из слоев SiO_2 и Si_3N_4 . С помощью этого покрытия за счет подбора коэффициентов отражения материалов в зоне термического влияния лазерного излучения можно управлять температурным профилем процесса рекристаллизации слоев поликремния (рис. 2). Кроме того, использо-

вание таких покрытий предотвращает растекание материала в процессе рекристаллизации. В оптимальных условиях лазерной рекристаллизации за счет селективного нагрева материала получены слои поликремния с размерами зерен до $20 \times 500 \text{ мкм}$ [9].

Температурные исследования КНИ-структур проводились в интервале температуры $4,2\text{—}300 \text{ К}$ в магнитном поле с индукцией до 14 Тл . Образцы охлаждались до $4,2 \text{ К}$ в гелиевом криостате. Для нагрева образцов до температуры 300 К использовалась специальная вставка с нагревателем из бифилярной проволоки, намотанной на ее корпус. Стабилизированный электрический ток в пределах $1\text{—}100 \text{ мкА}$ через образец задавался источником тока Keithley 224 в зависимости от сопротивления исследуемого материала. Электрическое напряжение на потенциальных контактах образцов, выходной сигнал термопары и датчика магнитного поля измерялись цифровыми вольтметрами типа Keithley 2000 и Keithley 2010 с точностью до $1 \cdot 10^{-6} \text{ В}$ с одновременной автоматической регистрацией показаний приборов через параллельный порт персонального компьютера, их визуализацией и записи массивов данных в файл.

Исследование влияния сильных магнитных полей на свойства слоев поликремния проводилось на установке, содержащей биттеровский магнит с индукцией до 14 Тл и временем развертки по полю $1,75$ или $3,5 \text{ Тл/мин}$ при температуре $4,2 \text{ К}$ и выше.

На импульсном ускорителе электронов типа микроэлектрон М-30 в Институте электронной физики НАНУ образцы поликремния облучали при температуре 300 К электронами с энергией 10 МэВ флюэнсом $1 \cdot 10^{16}$ и $1 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-2}$.

Экспериментальные результаты

Исследование характеристик слоев поликристаллического кремния при электронном облучении проводилось в широком температурном интервале — от

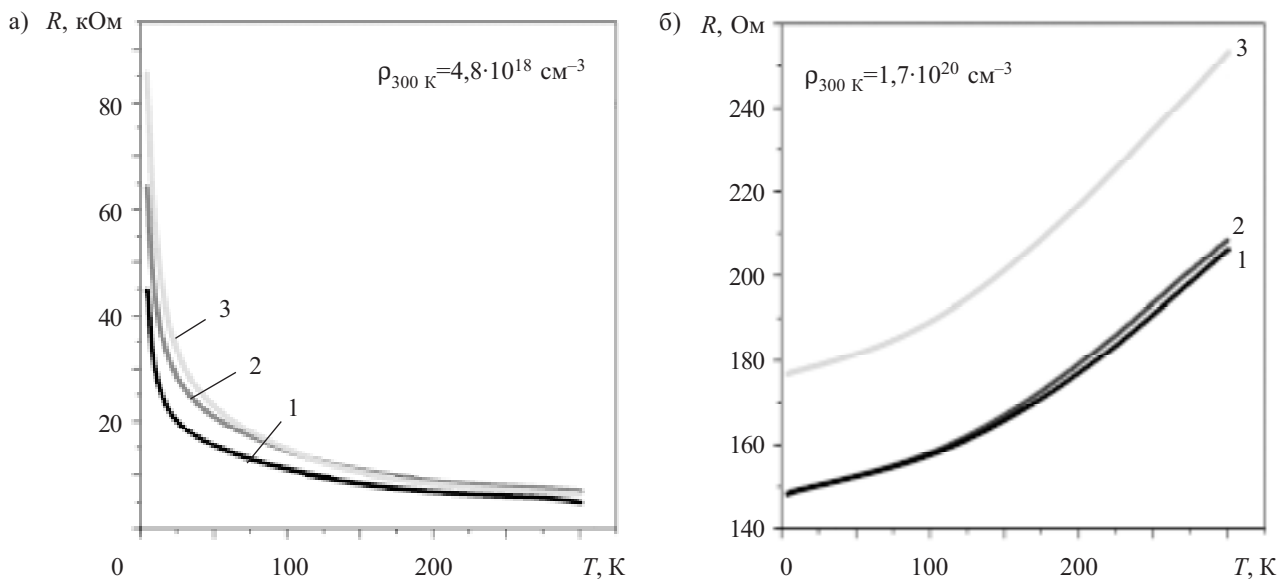


Рис. 3. Температурная зависимость сопротивления слоев слаболегированного (а) и сильнолегированного (б) поликремния до (1) и после облучения электронами различного флюэнса: 2 — $1 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-2}$; 3 — $1 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-2}$

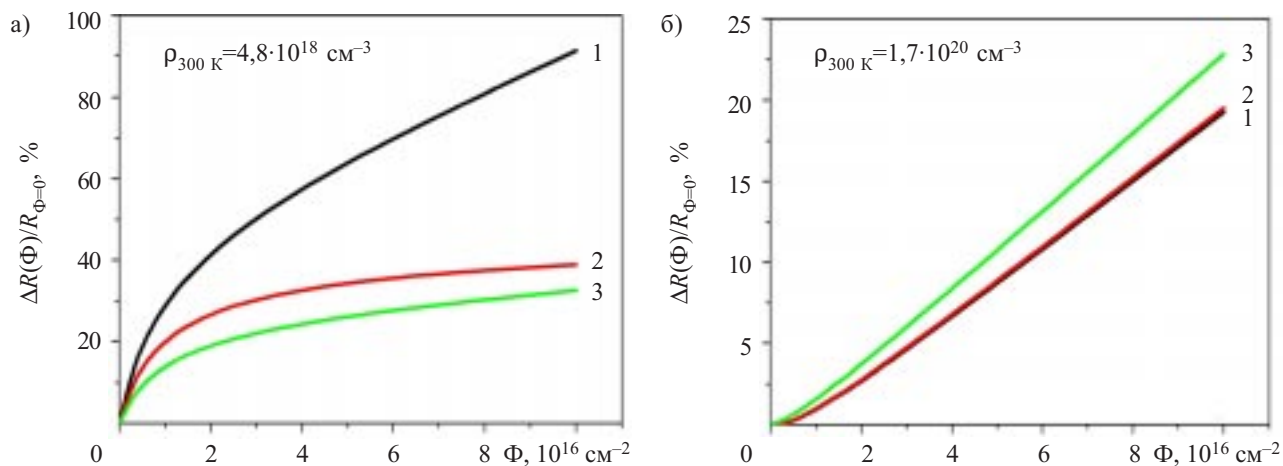


Рис. 4. Зависимость относительного изменения сопротивления слаболегированных (а) и сильнолегированных (б) слоев поликремния от флюэнса электронов при различной температуре (в К): 1 — 4,2; 2 — 77; 3 — 300

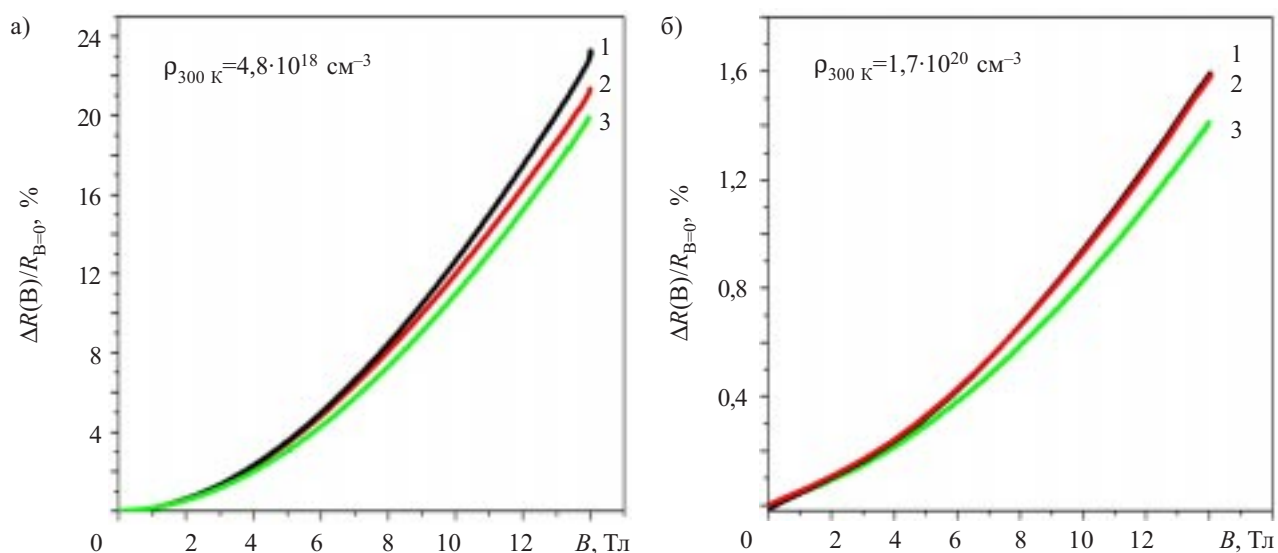


Рис. 5. Магнетосопротивление рекристаллизованных слаболегированных (а) и сильнолегированных (б) слоев поликремния до (1) и после облучения высокоэнергетическими электронами различного флюэнса: 2 — $1 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-2}$; 3 — $1 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-2}$

4,2 до 300 К. На **рис. 3** видно, что сопротивление слоев поликремния увеличивается после облучения высокоэнергетическими электронами. Эта зависимость сильнее проявляется для слаболегированных образцов с концентрацией носителей $4,8 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$ (рис. 3, а), в то время как для сильнолегированных образцов она значительно меньше (рис. 3, б). Это хорошо иллюстрирует **рис. 4**, на котором видно, что для слаболегированных слоев поликремния (рис. 4, а) зависимость его сопротивления от флюэнса электронов более сильно проявляется при температуре жидкого гелия. Отсюда следует вывод о радиационной стойкости сильнолегированных слоев поликремния на изоляторе, рекристаллизованных лазером, при облучении их высокоэнергетическими электронами флюэнсом $1 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-2}$, что может быть использовано для создания на их основе радиационностойких микроэлектронных датчиков физических величин.

Исследовалось также влияние электронного облучения на магнетосопротивление слоев поликремния в сильных магнитных полях (с индукцией до 14 Тл) при температуре жидкого гелия (**рис. 5**).

Как видно из рис. 3 и 5, наблюдается корреляция между влиянием электронного облучения на проводимость и магнетосопротивление слоев поликремния при низкой температуре.

Исследования показывают, что поликристаллический кремний состоит из мелких, соединяющихся своими границами монокристаллических зерен, которые, в свою очередь, состоят из разупорядоченных атомов [10]. В соответствии с моделью ловушек носителей заряда в легированном материале подвижные носители захватываются энергетическими состояниями на границах зерен. В результате такого захвата на поверхности зерен возникают как области пространственного заряда (обедненные носителями), так и по-

тенциальные барьеры. Лазерная рекристаллизация мелкозернистого поликремния приводит к увеличению среднего размера зерна, а значит, и к уменьшению общей площади поверхности зерен, на которой осуществляется захват свободных носителей заряда. Поскольку эффективный потенциальный барьер на границах зерен в рекристаллизованных слоях поликремния незначителен (менее 0,1 эВ), вероятность сегрегации примесей вдоль таких границ после облучения высокоэнергетическими электронами сильнолегированных пленок поликремния достаточно высока. Это приводит к уменьшению подвижности носителей заряда μ в облученных образцах по сравнению с необлученными и, соответственно, к уменьшению проводимости и магнетосопротивления поликремниевых слоев.

Если учесть, что магнетосопротивление описывается выражением [11] $\Delta R / R = a(\mu B)^2$, где a — коэффициент, который учитывает рассеяние носителей заряда, то становится понятным, что уменьшение магнетосопротивления поликремния после облучения, которое экспериментально наблюдалось в слоях образцов, обусловлено уменьшением подвижности носителей заряда в поликремнии.

Таким образом, установлено, что сильнолегированные бором слои поликремния на изоляторе, рекристаллизованные лазером, проявляют радиационную стойкость при облучении высокоэнергетическими электронами различного флюэнса, а изменение их сопротивления в магнитном поле до 14 Тл достаточно мало (не превышает 1—2%). Эти свойства можно использовать для создания микроэлектронных датчиков физических величин, работоспособных в условиях сильных магнитных полей, электронного облучения и криогенных температур.

ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ

1. Druzhinin A. A., Lavitskaya E. N., Maryamova I. I., Deshchinsky Y. L. Grain boundary effect on the conductivity and piezoresis-

tance of the polycrystalline silicon layers // *Functional Materials*.— 1996.— Vol. 3, N 1.— P. 58—61.

2. Druzhinin A., Lavitska E., Maryamova I., Kogut I. Laser recrystallization of polysilicon in sensor technology: possibilities and restrictions // *Silicon-on-Insulator Technology and Devices*.— Electrochem. Soc. Proc.— 1997.— Vol. 23.— P. 92—97.

3. Mosser V., Suski J., Goss J., Obermeier E. Piezoresistive pressure sensors based on polycrystalline silicon // *Sensors and Actuators*.— 1991.— Vol. A28.— P. 113—132.

4. Druzhinin A., Lavitska E., Maryamova I. et al. Mechanical sensors based on laser-recrystallized SOI structures // *Sensors and Actuators A. Physical*.— 1997.— Vol. A61.— P. 400—404.

5. Druzhinin A., Maryamova I., Lavitska E. et al. Laser recrystallized polysilicon layers for sensor application: electrical and piezoresistive characterization / In book: *Perspectives, Science and Technologies for Novel Silicon on Insulator Devices* // Ed. by P. L. F. Hemment.— Kluwer Acad. Publ, Dordrecht, 2000.— P. 127—135.

6. Druzhinin A., Lavitska E., Maryamova I., Khoverko Y. Laser recrystallized SOI layers for sensor applications at cryogenic temperatures // In book: *Progress in SOI structures and Devices Operating at Extreme Conditions* // Ed. by F. Balestra—Kluwer Acad. Publ., Netherlands, 2002.— P. 233—237.

7. Druzhinin A., Lavitska E., Maryamova I. et al. On possibility to extend the operation temperature range of SOI sensors with polysilicon piezoresistors // *Journal of Telecommunications and Information Technology*.— 2001.— № 1.— P. 40—45.

8. Дружинин А. А., Марьямова И. И., Матвиенко С. Н., Ховерко Ю. Н. Исследование свойств слоев поликремния на изоляторе при криогенных температурах для создания сенсоров // *Технология и конструирование в электронной аппаратуре*.— 2003.— № 6.— С. 10—13.

9. Druzhinin A. A., Kostur V. G., Kogut I. T. et al. Microzone laser recrystallized polysilicon layers on insulator // *Phys. and Techn. Problems of SOI Structures and Devices*.— NATO ASI Series: Kluwer Acad. Publ., Netherlands.— 1995.— P. 101—105.

10. Seto J. The electrical properties of polycrystalline silicon films // *J. Appl. Phys.*— 1975.— Vol. 46, N 12.— P. 5247—5254.

11. Жданова Н. Г., Каган М. С., Ландсберг Е. Г. Электронная локализация в невырожденных полупроводниках с произвольным потенциалом заряженных примесей // *ЖЭТФ*.— 2000.— Т. 117, № 4.— С. 761—770.

НОВЫЕ КНИГИ

НОВЫЕ КНИГИ

Проектирование систем цифровой и смешанной обработки сигналов / Под ред. У. Кестера.— М.: Техносфера, 2010.— 328 с.

Книга посвящена как теоретическим, так и прикладным аспектам создания аналого-цифровых систем обработки сигналов. Рассматриваются вопросы аналого-цифрового и цифро-аналогового преобразования, даются основы цифровой обработки сигналов, цифровой фильтрации, спектрального анализа. Отдельная глава посвящена вопросам конструирования, таким как компоновка устройства, разводка печатных плат, передача сигналов по высокоскоростным интерфейсам, сопряжение цифровых и аналоговых блоков устройства.

Для инженеров и студентов радиотехнических и других смежных специальностей.

