

Д. т. н. А. А. ДРУЖИНИН, к. т. н. И. И. МАРЬЯМОВА,  
С. Н. МАТВИЕНКО, Ю. Н. ХОВЕРКО

Украина, Национальный университет "Львовская политехника"  
E-mail: druzh@polynet.lviv.ua

Дата поступления в редакцию  
23.05 2003 г.

Оппонент к. ф.-м. н. Е. М. СЕМАШКО  
("Сатурн-Микро", г. Киев)

## ИССЛЕДОВАНИЕ СВОЙСТВ СЛОЕВ ПОЛИКРЕМНИЯ НА ИЗОЛЯТОРЕ ПРИ КРИОГЕННЫХ ТЕМПЕРАТУРАХ ДЛЯ СОЗДАНИЯ СЕНСОРОВ

*Показана возможность создания сенсоров механических величин, а также терморезисторов, для диапазона 4,2 ... 300 К на основе легированных слоев поликремния.*

Создание новых типов микроэлектронных сенсоров, работоспособных в различных температурных диапазонах, в т. ч. при криогенных температурах, приобретает в настоящее время особую актуальность в связи с развитием, в частности, космической техники и криоэнергетики. Перспективной элементной базой сенсоров являются слои поликристаллического кремния на изолирующих подложках (в виде КНИ-структур), использование которых может быть положено в основу разработки серийноспособной технологии микроэлектронных сенсоров физических величин.

В предыдущих работах авторов [1—3] приведены результаты исследования этого материала в климатическом диапазоне температур и при повышенных температурах, а также описаны разработанные пьезорезистивные сенсоры механических величин для этих температурных диапазонов. Показано, в частности, что использование микронной лазерной рекристаллизации слоев поликремния [2, 4] позволяет повысить чувствительность слоев поли-Si к деформации, повысить их температурную стабильность и, соответственно, существенно улучшить характеристики пьезорезистивных сенсоров на их основе.

Целью настоящей работы является исследование возможности использования этого материала для создания сенсоров физических величин, работоспособных при криогенных температурах вплоть до температуры жидкого гелия (4,2 К).

### Теоретические основы

Поликристаллический кремний представляет собой набор малых монокристаллических зерен, соединенных границами зерен (ГЗ), которые, в свою очередь, состоят из разупорядоченных атомов. В рамках модели ловушек носителей заряда в легированном материале подвижные носители захватываются энергетическими состояниями на границах зерен. В результате такого захвата на границах зерен возникают как области пространственного заряда (области,

обедненные основными носителями заряда), так и потенциальные барьеры на границах зерен.

В приближении частичного обеднения зерна для поликремния *p*-типа, легированного бором, была разработана программа для числового расчета электрических и пьезорезистивных свойств слоев поли-Si с разным размером зерна. Как основной механизм переноса носителей в поли-Si предполагается надбарьерный перенос носителей заряда в комбинации с диффузией через границы зерен и дрейфом носителей заряда через кристаллиты [5]. Числовые расчеты осуществлялись на основе допущения о частичном обеднении зерна.

Известно, что для поликристаллического материала электропроводность очень похожа на электропроводность неупорядоченных полупроводников. В зависимости от среднего размера зерна, уровня легирования и других факторов доминирующим становится тот или иной механизм переноса носителей заряда: от надбарьерного механизма до протекания электронов по состояниям ловушек на ГЗ. В общем случае эффективная электропроводность может быть записана как

$$\sigma_{ef} = \sigma_g + \sigma_b(h/r_0), \quad (1)$$

где  $\sigma_g$  и  $\sigma_b$  — электропроводность по зернам и надбарьерная проводимость;

$h$  — ширина границы зерен;

$r_0$  — эффективный размер зерна.

Если зерно полностью или почти обеднено носителями, то первым слагаемым в формуле (1) можно пренебречь,  $\sigma_g \rightarrow 0$ , и электропроводность осуществляется за счет переноса носителей по локализованным состояниям на границах зерен. Такая электропроводность может быть реализована при низком уровне легирования и малых размерах зерен, независимо от температуры наблюдения.

При криогенных температурах, когда ожидается значительное вымораживание носителей, количество носителей в объеме зерна становится очень малым, за исключением случая очень высокого уровня легирования (металлический тип электропроводности). Поэтому как основной механизм переноса нужно рассматривать квантовый механизм переноса носителей заряда по состояниям на границах зерен. Разница в высоте барьеров на границах зерен приводит к случайному потенциальному рельефу, обусловленному

искривлением энергетических зон возле границ зерен. Поэтому эта система должна рассматриваться как очень сильно легированный и компенсированный полупроводник, где состояния на границах зерен играют роль компенсирующих примесей. Чем ниже температура, тем больше вклад в электрические свойства квантового механизма переноса, и его можно описать с помощью теории протекания носителей заряда [6].

### Подготовка образцов

В качестве исходного материала использовались слои поликремния толщиной 0,5 мкм, осажденные методом LPCVD при 625°C на термически окисленные пластины кремния *p*-типа с ориентацией (100). Легирование бором проводилось методом ионной имплантации. Слои поли-Si рекристаллизовали на воздухе облучением лазера ИАГ:Nd<sup>+</sup> ( $\lambda=1,06$  мкм, мощность 10—20 Вт), сканируя поверхность пластины лазерным лучом, сфокусированным до пятна диаметром  $\approx 150$  мкм [1, 7]. Для оптимизации технологии лазерной обработки на пластины Si предварительно наносилось комбинированное покрытие, которое содержало пленки SiO<sub>2</sub> и полоски Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>. Такое покрытие позволяло создавать определенный температурный профиль во время лазерной обработки для локализации дефектов и стабилизации роста кристаллитов. Воздействие сканирующего луча сопровождалось плавлением слоя поликремния по всей глубине со средним размером зерна в плоскости до нескольких десятков (10—30) мкм [1, 2].

Для исследований были изготовлены образцы тестовых КНИ-структур, легированных бором до концентрации  $2,4 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$  и  $3,9 \cdot 10^{19} \text{ см}^{-3}$ . После лазерной рекристаллизации концентрации носителей в образцах составляли  $4,8 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$  и  $1,7 \cdot 10^{20} \text{ см}^{-3}$ , соответственно.

### Результаты эксперимента и их обсуждение

Для оценки возможности использования поли-Si-резисторов при криогенных температурах были проведены измерения температурной зависимости сопротивления поли-Si-образцов до и после лазерной рекристаллизации в диапазоне температур 4,2...300 К — как для свободных, так и для деформированных образцов. Кроме того, были проведены измерения магнитосопротивления этих образцов при температуре жидкого гелия в сильных магнитных полях (до 14 Тл).

На рис. 1 показаны зависимости  $R=f(T)$  для исходных микрокристаллических образцов КНИ-структур, легированных бором, с различной концентрацией носителей заряда. Из рис. 1, а (вставка) видно, что в температурном интервале 10—25 К удельное сопротивление сравнительно слабо легированного образца описывается законом Мотта ( $\ln \rho \sim T^{-1/4}$ ). Это указывает на доминирующий характер прыжковой проводимости при низких температурах. В случае сильного уровня легирования (рис. 1, б) проводимость имеет характер, промежуточный между прыжковой и проводимостью металлического типа.

На рис. 2 представлены температурные зависимости сопротивления тех же образцов, что и на рис. 1,

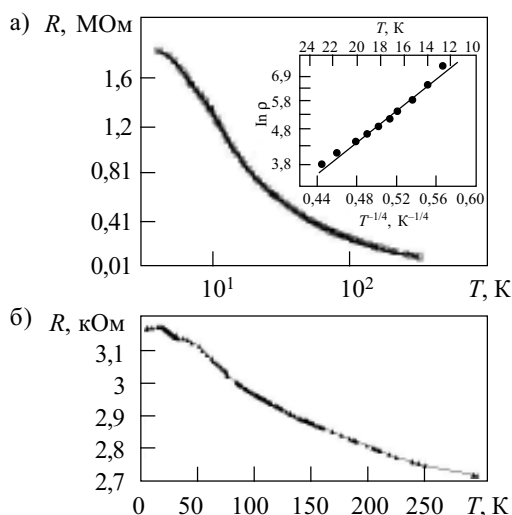


Рис. 1. Температурная зависимость сопротивления нерекристаллизованного поли-Si-образца с различной концентрацией свободных носителей заряда: а —  $2,4 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$ ; б —  $3,9 \cdot 10^{19} \text{ см}^{-3}$

после лазерной рекристаллизации. Лазерная рекристаллизация поли-Si приводит к увеличению эффективного размера зерна. Это одновременно приводит к уменьшению общей поверхности границ зерен, на которых происходит захват свободных носителей заряда. После лазерной рекристаллизации зёрна поликристаллического кремния имеют форму, удлинённую в направлении сканирования лазерного луча. Это значит, что средний размер зерна вдоль направления сканирования больше среднего размера зерна в направлении, поперечном сканированию, что соответствует большему значению сопротивления поперечных поли-Si-резисторов в тестовых структурах.

Исследование температурной зависимости удельного сопротивления в области 4,2—300 К показало существование различных механизмов транспорта носителей заряда в рекристаллизованных слоях поликремния в зависимости от рассматриваемого диапазона температур. Так, в области относительно высо-

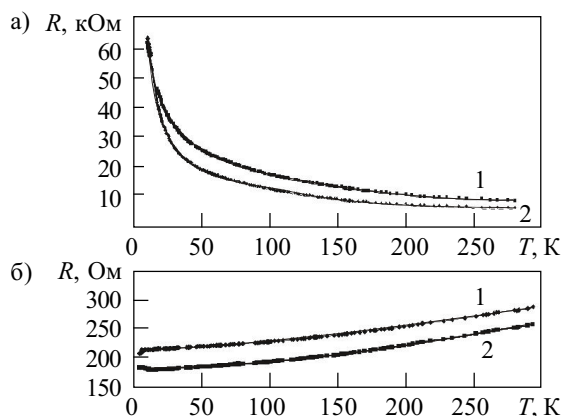


Рис. 2. Температурная зависимость сопротивления рекристаллизованных лазером поли-Si-резисторов с различной концентрацией носителей: а —  $4,8 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$ , б —  $1,7 \cdot 10^{20} \text{ см}^{-3}$  1 — поперечный (относительно направления лазерного сканирования) резистор; 2 — продольный резистор

ких температур (180—300 К) токоперенос связан с движением дырок по объему зерен. При низких температурах (4,2—20 К) проводимость обусловлена движением носителей заряда вдоль границ зерен и характеризуется весьма низкими энергиями активации (десятые доли мэВ). В промежуточной области температур проводимость ограничена межзеренными барьерами.

Исследования вольт-амперных характеристик рекристаллизованных слоев поликремния при различных температурах подтвердили эти результаты. В области комнатных температур, где определяющим является перенос дырок по объему зерен, наблюдается линейная зависимость тока от напряжения (рис. 3). При низких температурах (около гелиевых) ВАХ характеризуется как линейным участком (при малых напряжениях), так и значительной нелинейностью типа

$$I = I_0 \exp[(U/U_0)^{1/2}]. \quad (2)$$

Такой вид ВАХ характерен для перколяционных систем (с крупномасштабным рельеф-потенциалом) и хорошо описывается известной моделью Шкловского—Эфроса [6].

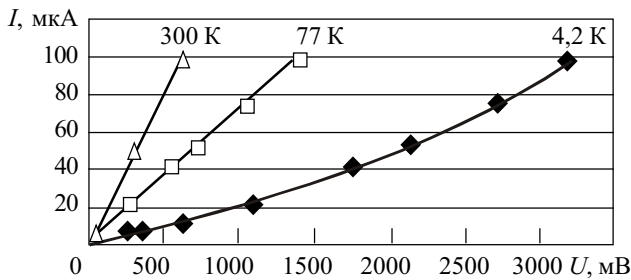


Рис. 3. Вольт-амперные характеристики рекристаллизованных лазером поли-Si-резисторов с концентрацией носителей  $4,8 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$

Из сравнения рис. 2, б с рис. 1 и 2, а можно сделать вывод, что поли-Si-резисторы, которые имеют наибольшую концентрацию свободных носителей заряда, характеризуются наименьшей температурной зависимостью сопротивления в диапазоне температур 4,2—300 К. Напротив, нерекристаллизованные поли-Si-резисторы со средним уровнем легирования  $\sim 2,4 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$  имеют сильную температурную зависимость сопротивления в этом диапазоне температур и могут быть рекомендованы в качестве терморезисторов.

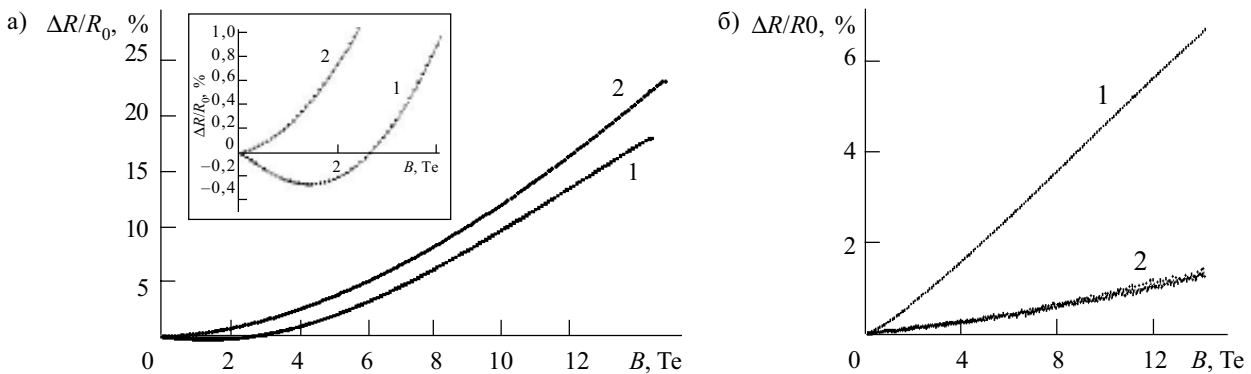


Рис. 4. Влияние продольного магнитного поля на сопротивление поли-Si-резисторов с различной концентрацией свободных носителей заряда в нерекристаллизованных образцах: а —  $2,4 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$ ; б —  $3,9 \cdot 10^{19} \text{ см}^{-3}$ ; 1 — до лазерной рекристаллизации; 2 — после рекристаллизации

На рис. 4 приведены результаты измерений магнитосопротивления тестовых структур при 4,2 К. Интересным результатом является то, что в нерекристаллизованных поли-Si-резисторах, для которых концентрация электрически активных примесей соответствует диэлектрической стороне перехода "металл—диэлектрик в кремнии", наблюдается явление отрицательного магнитосопротивления в сравнительно слабых магнитных полях, которое при увеличении напряженности магнитного поля переходит в положительное магнитосопротивление (рис. 4, а, кривая 1). В образцах, рекристаллизованных лазерным излучением, свойства которых приближаются к свойствам монокристаллических образцов, наблюдалось только положительное магнитосопротивление (рис. 4, кривые 2). Это позволяет трактовать появление отрицательного магнитосопротивления в поли-Si-резисторах особенностями электронного переноса, связанного с потенциальными барьерами на границах зерен в поликристаллическом материале.

В образцах поли-Si, сильно легированных бором, с исходной концентрацией носителей заряда  $3,9 \cdot 10^{19} \text{ см}^{-3}$  после лазерной рекристаллизации наблюдается очень малая величина магнитосопротивления по сравнению с нерекристаллизованным поли-Si (рис. 4, б), при этом изменение сопротивления поли-Si-резисторов в магнитном поле до 14 Тл не превышает 1%.

Для исследования пьезорезистивных свойств поли-Si-резисторов в диапазоне 4,2...300 К использовалась оригинальная методика [8], которая была разработана для исследования деформационных характеристик полупроводниковых микрокристаллов. Методика предусматривает использование термической деформации, которая возникает при закреплении исследуемого образца на подложке вследствие различия температурных коэффициентов линейного расширения (ТКР) материалов образца и подложки. При закреплении поли-Si-резисторов на медных подложках на образцы поликремния действует деформация сжатия, поскольку ТКР меди больше ТКР кремния. Сама величина деформации, действующей на исследуемый образец, рассчитывается для каждой точки температурного диапазона исходя из табличных значений ТКР кремния и меди [9].

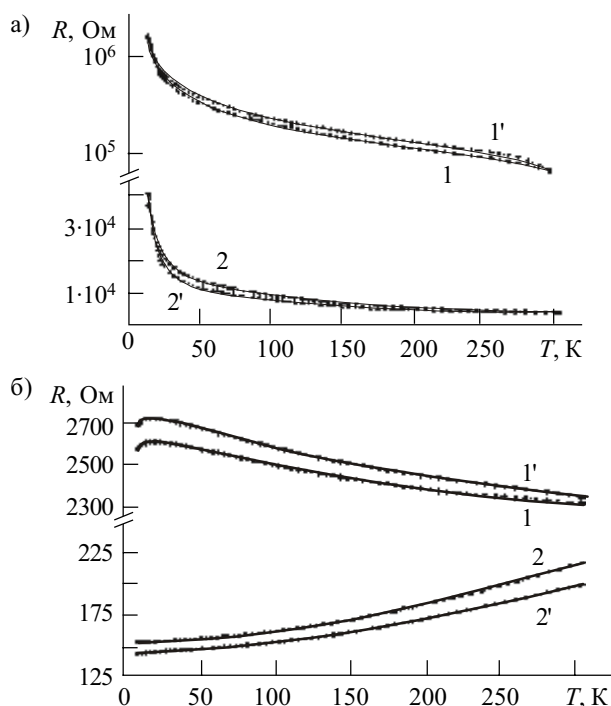


Рис. 5. Температурные зависимости сопротивления поли-Si-резисторов с начальной концентрацией носителей заряда  $2,4 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$  (а) и  $3,9 \cdot 10^{19} \text{ см}^{-3}$  (б): 1, 2 — свободные образцы; 1', 2' — деформированные при закреплении на медной подложке; 1, 1' — до лазерной рекристаллизации; 2, 2' — после рекристаллизации

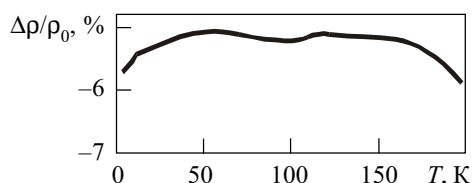


Рис. 6. Температурная зависимость относительного изменения удельного сопротивления под действием деформации для рекристаллизованных поли-Si-резисторов с концентрацией носителей  $1,7 \cdot 10^{20} \text{ см}^{-3}$

Графики на рис. 5 содержат экспериментальные данные по температурным зависимостям сопротивления слоев поликремния, свободных и деформированных (закрепленных на подложках из меди). Измерения проводились как на мелкокристаллическом поликремнии, так и на поли-Si, рекристаллизованном лазерным излучением. Как видно из графиков, наиболее сильное изменение сопротивления с деформацией наблюдается в поли-Si-резисторах с уровнем легирования  $>10^{19} \text{ см}^{-3}$  (рис. 5, б). Такие резисторы пригодны для создания пьезорезистивных сенсоров механических величин, работоспособных при криогенных температурах.

Если выдвигается дополнительное требование — обеспечить стабильную работу сенсоров механических величин при криогенных температурах и в сильных магнитных полях, то, исходя из проведенных исследований магнитосопротивления тестовых структур в магнитных полях, предпочтение следует отдать сильно легированным поли-Si-резисторам, которые подвергались лазерной обработке со сканированием

вдоль оси резистора, с концентрацией носителей заряда  $1,7 \cdot 10^{20} \text{ см}^{-3}$ . Для таких поли-Si-резисторов температурная зависимость относительного изменения сопротивления, вызванного деформацией, выражена очень слабо во всем исследованном диапазоне температур (рис. 6).

### Выводы

1. На основе исследований температурной зависимости сопротивления нерекристаллизованных слоев поликремния на диэлектрических подложках для образцов с концентрацией примесей  $\sim 2,4 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$  установлен доминирующий характер прыжковой проводимости при низких температурах в интервале 4,2—25 К.

2. Показано, что нерекристаллизованные поли-Si-резисторы со средним уровнем легирования  $\sim 2,4 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$  имеют сильную температурную зависимость сопротивления и могут быть рекомендованы для применения в качестве высокочувствительных терморезисторов для температурного диапазона 4,2—300 К.

3. Исследования влияния деформации на сопротивление поли-Si-резисторов показали, что сильно легированные поли-Si-резисторы, рекристаллизованные лазерным излучением, с концентрацией примесей  $\sim 1,7 \cdot 10^{20} \text{ см}^{-3}$  обладают наибольшей чувствительностью к деформации, которая слабо зависит от температуры. Это позволяет использовать их для создания пьезорезистивных сенсоров механических величин, работоспособных при криогенных температурах. Одновременно такие структуры являются наиболее стабильными при воздействии сильных магнитных полей.

### ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ

- Voronin V. A., Druzhinin A. A., Maryamova I. I. et al. Laser recrystallized polysilicon layers in sensors // Sensors and Actuators.— 1992.— Vol. 30, N 1—3.— P. 143—147.
- Voronin V. A., Maryamova I. I., Druzhinin A. A. et al. SOI pressure sensors based on laser recrystallized polysilicon // Phys. and Tech. Problems of SOI Structures and Devices.— NATO ASI Series: Kluwer Acad. Publishers, Netherlands, 1995.— P. 281—286.
- Druzhinin A., Lavitska E., Maryamova I. et al. On possibility to extend the operation temperature range of SOI sensors with polysilicon piezoresistors // Journ. of Telecommunication and Information Technology.— 2001.— N 1.— P. 40—45.
- 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. 97-23.— P. 92—97.
- Lavitskaya E. N., Druzhinin A. A., Maryamova I. I., Deshchinsky Y. L. Grain boundary effect on the conductivity and piezoresistance of the polycrystalline silicon layers // Functional Materials.— 1996.— Vol. 3, N 1.— P. 58—61.
- Шкловский В. И., Эфрос А. Л. Электронные свойства легированных полупроводников: М.: Наука, 1979.
- Druzhinin A. A., Kostur V. G., Kogut I. I. 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.
- Druzhinin A., Lavitska E., Maryamova I. et al. Studies of piezoresistance and piezomagneto-resistance in Si whiskers at cryogenic temperatures // Crystal Technology.— 2002.— Vol. 37, N 2—3.— P. 243—247.
- Новикова С. И. Тепловое расширение твердых тел: М.: Наука, 1974.