

Таким образом, с одной стороны, явление кинетики ускоренного роста оксида на начальном этапе окисления с учетом десорбции зависит от концентрации точечных избыточных дефектов, а с другой, именно эти дефекты и определяют электрофизические свойства образованных структур кремний – диоксид кремния. Целенаправленное управление начальным процессом окисления с подбором режима окисления дает возможность управлять свойствами образованной системы Si – SiO<sub>2</sub>, которые очень важны для получения высококачественных приборов на основе МОП – структур.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Арсламбеков В.А., Сафаров А.С. Некоторые особенности механизма и кинетики окисления кремния // Микроэлектроника. 1977. Т.6. Вып. 1. С. 75 – 81.
2. Сафаров А.С. Исследование методами ОЭС и ВИМС взаимодействия кислорода с поверхностью кремния. // Материалы международной XI – конференции ВИП – 93. М., 1993. Т. 2. С. 99 – 101.
3. Сафаров А.С. Новые проблемы при образовании оксида кремния. Микроэлектроника. Т. 26. Вып. 1. М., 1997. С. 73 – 75.

Поступила 24.12.02

## Summary

In this work mentioned about the properties of the overthin layer of the SiO<sub>2</sub>. Showed that the chargeable condition at the boundary between Si and SiO<sub>2</sub> depends on conditions of the oxidation.

---

М.К. Бахадирханов, Х.М. Илиев, К.С. Аюпов, Х.Ф. Зикриллаев, О.Э. Сатторов

## ОТРИЦАТЕЛЬНОЕ МАГНИТОСОПРОТИВЛЕНИЕ В СИЛЬНОКОМПЕНСИРОВАННОМ КРЕМНИИ

Ташкентский государственный технический университет им. А.Р. Беруни,  
ул. Университетская, 2, г. Ташкент, 700095, Узбекистан

Эффект отрицательного магнитосопротивления (ОМС) в полупроводниках с мелкими примесями и в полупроводниках, слабокомпенсированных с примесями элементов переходных металлов, обнаружен при температурах жидкого гелия [1–3]. Этот эффект представляет интерес с теоретической точки зрения, поскольку физический механизм ОМС в полупроводниках окончательно не выяснен, а также и в плане практического применения. Полупроводники с ОМС могут быть применены в качестве высокочувствительных датчиков в области автоматики и вычислительной техники. Для практического применения этих полупроводников необходимо, чтобы ОМС в них наблюдалось при комнатной температуре и в слабых магнитных полях. Поэтому поиск новых полупроводниковых материалов с ОМС при комнатной температуре остается актуальным.

В полупроводниках при выполнении условий сильной компенсации  $N_a \approx N_d$  из-за перераспределения носителей заряда между мелкими и глубокими уровнями [4] концентрация равновесных носителей заряда  $n_0$  и  $p_0$  в  $10^5 - 10^6$  раз меньше, чем концентрация примесных ионов  $N_d^{+n}$ ,  $N_a^{-m}$ . Отсутствие локальной электронейтральности и экранировка электрическим полем, создаваемым многократно заряженными примесными ионами и кластерами, приводят не только к существенному изменению потенциала в кристаллической решетке, но и к значительной структурной перестройке самой матрицы. Вблизи таких центров начинают проявляться черты, характерные для неупорядоченных систем. Все это дает основание считать, что полупроводники в условиях сильной компенсации представляют собой новый класс полупроводниковых материалов. Действительно, как показали результаты исследований, в таких материалах наблюдается ряд новых физических явлений, не характерных для некомпенсированных и слабокомпенсированных полупроводниковых материалов, – аномально высокая фоточувствительность, глубокое инфракрасное и температурное гашение фотопрово-

димости, большая остаточная проводимость, автоколебания тока различной природы и т.д.

Использование в качестве компенсирующих примесей элементов переходной группы позволяет существенно варьировать магнитными свойствами материала, так как ионы переходных металлов в полупроводниках могут иметь различные магнитные моменты в зависимости от их положения в кристаллической решетке и зарядового состояния иона.

С целью выявления особенностей магнитосопротивления сильнокомпенсированных полупроводников с магнитными примесями исследовано магнитосопротивление в компенсированном марганцем кремнии с различной степенью компенсации. Компенсированные образцы  $\text{Si}\langle\text{B},\text{Mn}\rangle$  получены диффузионным легированием кремния марганцем из газовой фазы. В качестве исходного материала использован монокристаллический кремний  $p$ -типа проводимости с удельным сопротивлением  $10 \text{ Ом}\cdot\text{см}$  (марки КДБ-10). При этом температура и время диффузионного отжига выбирались таким образом, чтобы получить компенсированные и перекомпенсированные образцы  $\text{Si}\langle\text{B},\text{Mn}\rangle$   $p$ - и  $n$ -типа проводимости с удельным сопротивлением при комнатной температуре  $10^2 - 10^5 \text{ Ом}\cdot\text{см}$ . Магнитосопротивление в компенсированных образцах  $\text{Si}\langle\text{B},\text{Mn}\rangle$  измерялось при комнатной температуре в продольном ( $\mathbf{H} \parallel \mathbf{I}$ ) и поперечном ( $\mathbf{H} \perp \mathbf{I}$ ) магнитном поле. Напряженность поля изменялась в интервале  $H = 0 - 20 \text{ кЭрс}$ , то есть в условиях слабых магнитных полей. Измерения показали, что как положительное, так и отрицательное магнитосопротивление при поперечном направлении магнитного поля имеет большие значения, чем при продольном направлении магнитного поля. Результаты исследования зависимости магнитосопротивления в компенсированных и перекомпенсированных образцах  $\text{Si}\langle\text{B},\text{Mn}\rangle$  при поперечном магнитном поле показали, что величина и знак магнитосопротивления в компенсированных образцах сильно зависят от степени компенсации и типа проводимости. В перекомпенсированных образцах  $n\text{-Si}\langle\text{B},\text{Mn}\rangle$  во всем исследованном интервале напряженности магнитного поля независимо от значения удельного сопротивления наблюдалось только положительное магнитосопротивление. В компенсированных образцах  $p\text{-Si}\langle\text{B},\text{Mn}\rangle$  в зависимости от значения удельного сопротивления меняется не только величина, но и знак магнитосопротивления (рис.1). В образцах  $p\text{-Si}\langle\text{B},\text{Mn}\rangle$  с  $\rho \sim 10^2 \text{ Ом}\cdot\text{см}$  наблюдается небольшое положительное магнитосопротивление (ПМС), а с ростом удельного сопротивления материала значение ПМС уменьшается и начиная с  $\rho \geq 8 \cdot 10^2 \text{ Ом}\cdot\text{см}$  наблюдается ОМС. Значение ОМС растет с ростом удельного сопротивления образцов и достигает максимума при  $\rho \sim 5 \cdot 10^3 \text{ Ом}\cdot\text{см}$ , а дальнейшее увеличение удельного сопротивления приводит к уменьшению ОМС. Начиная с  $\rho \geq 4 \cdot 10^4 \text{ Ом}\cdot\text{см}$  вновь наблюдается ПМС.

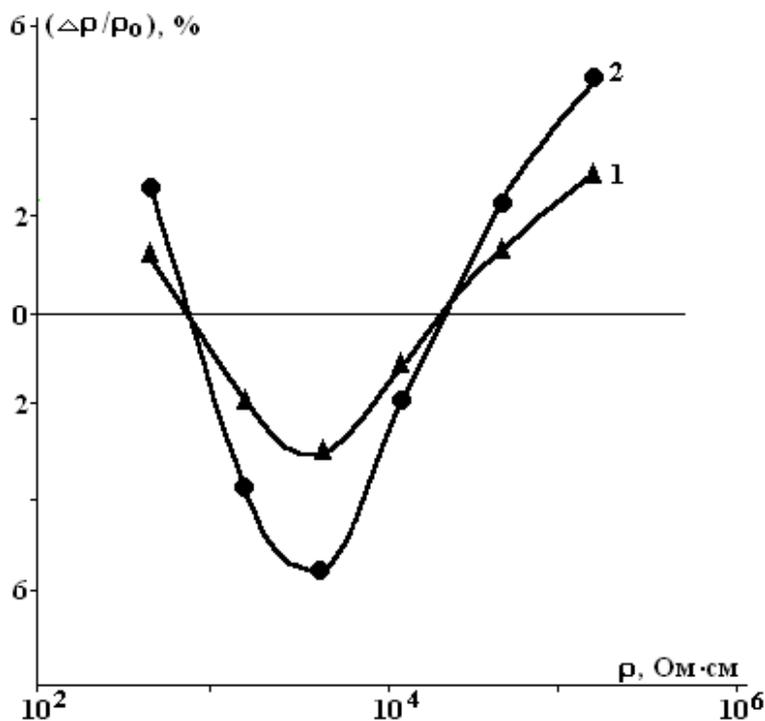


Рис.1. Зависимость магнитосопротивления от степени компенсации при постоянном электрическом поле ( $E = 100 \text{ В/см}$ ) при комнатной температуре.  
1 –  $H = 5 \text{ кЭрс}$ , 2 –  $H = 15 \text{ кЭрс}$

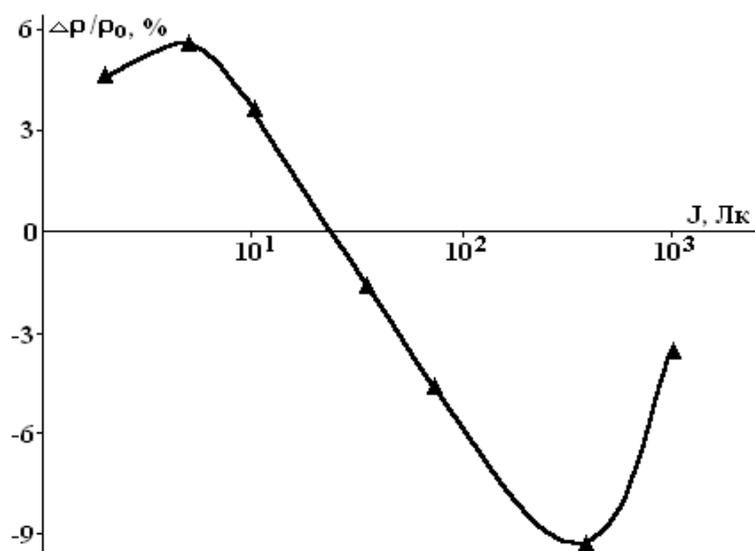


Рис.2. Зависимость магнитосопротивления в образцах  $\text{Si}\langle\text{B,Mn}\rangle$  с  $\rho = 2 \cdot 10^5 \text{ Ом}\cdot\text{см}$  от интенсивности интегрального света.  
 $T = 300 \text{ К}$ ,  $H = 15 \text{ кЭрс}$

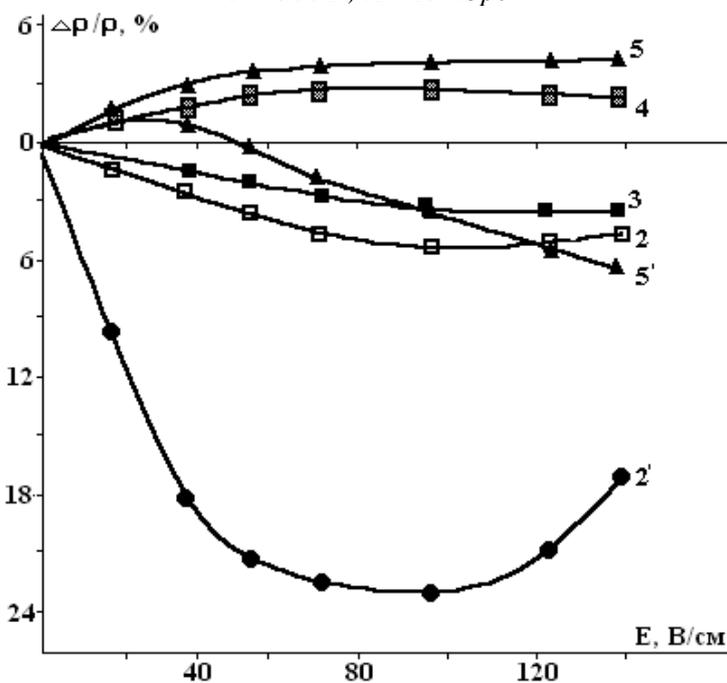


Рис.3. Зависимость магнитосопротивления от электрического поля при различных значениях удельного сопротивления образцов.  
 I – в темноте: 1 –  $\rho = 5 \cdot 10^2 \text{ Ом}\cdot\text{см}$ , 2 –  $\rho = 6,2 \cdot 10^3 \text{ Ом}\cdot\text{см}$ , 3 –  $\rho = 10^4 \text{ Ом}\cdot\text{см}$ , 4 –  $\rho = 6,5 \cdot 10^4 \text{ Ом}\cdot\text{см}$ , 5 –  $\rho = 2,5 \cdot 10^5 \text{ Ом}\cdot\text{см}$ . II – при освещении ( $J = 150 \text{ Лк}$ ): 2' –  $\rho = 6,2 \cdot 10^3 \text{ Ом}\cdot\text{см}$ , 5' –  $\rho = 2,5 \cdot 10^5 \text{ Ом}\cdot\text{см}$

Как известно из данных [5, 6], сильно компенсированные образцы  $p\text{-Si}\langle\text{B,Mn}\rangle$  обладают большой фоточувствительностью, что позволяет управлять удельным сопротивлением материала в широком интервале в зависимости от уровня освещения. Поэтому исследовалось влияние интегрального освещения на магнитосопротивление в сильнокомпенсированном  $\text{Si}\langle\text{B,Mn}\rangle$  с  $\rho \sim 10^5 \text{ Ом}\cdot\text{см}$ . На рис.2 приведены зависимости магнитосопротивления образца от интенсивности интегрального света. При малых значениях интенсивности освещения магнитосопротивление положительно и растет с увеличением интенсивности освещения. При некоторых значениях интенсивности достигает максимума и далее уменьшается, и при определенном значении интенсивности освещенности переходит в отрицательное магнитосопротивление, которое начинает резко возрастать, переходя через максимум при интенсивности освещения  $J = 150 \text{ Лк}$ . С дальнейшим увеличением освещенности ОМС уменьша-

ется и при относительно больших интенсивностях переходит к положительному магнитосопротивлению. Необходимо отметить, что в интервале значений интенсивности, где проявляется отрицательный участок магнитосопротивления, значения удельного сопротивления образца находятся в пределе от  $\rho = 6 \cdot 10^4$  до  $5 \cdot 10^2$  Ом·см. Следовательно, в одном и том же компенсированном образце  $p$ -Si<B,Mn> с  $\rho \sim 10^5$  Ом·см, меняя уровень освещенности, можно наблюдать положительное, нулевое и отрицательное магнитосопротивление. Эти данные полностью соответствуют результатам исследования магнитосопротивления компенсированных образцов в зависимости от удельного сопротивления в темноте (рис. 1). Таким образом, однозначно установлено, что отрицательное магнитосопротивление в образцах Si<B,Mn> наблюдается в интервале удельного сопротивления  $\rho = 5 \cdot 10^2 - 6 \cdot 10^4$  Ом·см. Показано, что в одном и том же образце, управляя освещенностью, можно получить различные значения удельного сопротивления и соответственно МС.

Магнитосопротивление имеет существенную чувствительность к напряженности электрического поля. Исследовано влияние электрического поля на магнитосопротивление в темноте и при различных уровнях интегрального освещения в компенсированных  $p$ -Si<B,Mn> и перекомпенсированных  $n$ -Si<B,Mn> образцах с удельным сопротивлением  $\rho = 10^2 \div 10^5$  Ом·см при комнатной температуре. В перекомпенсированных образцах  $n$ -Si<B,Mn> наблюдаемое как в темноте, так и при освещенности ПМС во всем исследованном интервале напряженности электрического поля сохраняет свой знак. В отличие от этого, в компенсированных образцах  $p$ -Si<B,Mn> знак МС сильно зависит от напряженности электрического поля. Как видно из рис.3, МС сохраняется и оно положительно (кривые 1, 4, 5). В образцах с удельным сопротивлением в интервале ( $5 \cdot 10^2 < \rho < 10^4$  Ом·см) знак МС отрицателен и он сохраняется, (кривые 2, 3). Следует отметить, что при освещении интегральным светом в образцах с  $\rho \approx 6 \cdot 10^4 \div 10^5$  Ом·см появляется возможность изменять знак МС с помощью электрического поля (кривая 5'), а в образцах с  $\rho \sim 10^3$  Ом·см получить сверхвысокое значение ОМС при комнатной температуре (кривая 2'). Таким образом, величиной и знаком МС можно управлять не только степенью компенсации и освещенностью, но также и электрическим полем. Обнаруженные и исследованные особенности в компенсированном марганцем кремнии, видимо, являются результатом взаимодействия внутренних электрических полей, существующих в сильнокомпенсированных полупроводниках, магнитных моментов компенсирующих примесей и внешних электрических полей. Результат этих взаимодействий, очевидно, сильно изменяется при изменении степени компенсации полупроводника, освещении и изменении внешних электрических полей.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Toyozawa Y. Theory of localized spins and negative magnetoresistance in the metallic impurity conduction // Journal of the physical society of Japan. 1962, vol. 17. № 6. P.986-1004;
2. Агаев Я., Масонов О., Суханов С. Исследование эффекта магнитосопротивления InSb и его технического применения // Физические свойства полупроводников  $A^{III}B^V$  и  $A^{II}B^{VI}$ . Изд. АН Азербайджанской ССР.: Баку, 1967. С. 122–128.
3. Гарячдыев Г., Емельяненко О.В., Зотова Н.В., Лагунова Т.С., Наследов Д.И. Отрицательное магнитосопротивление в компенсированном арсениде индия  $n$ -типа // ФТП. 1973 . Т. 7. В. 4 . С. 700–706.
4. Болткс Б.И., Бахадирханов М.К., Городецкий С.М., Куликов Г.С. Компенсированный кремний. Л.: Наука, 1972. С.12-24;
5. Бахадирханов М.К., Камиллов Т.С. и другие. Фотоэлектрические свойства кремния  $p$ -типа легированного марганцем // ФТП. Т. 9. Вып. 11975. С. 76–80.
6. Бахадирханов М.К., Азизов К.А. и др. Инфракрасное гашение фото и остаточной проводимостей в  $n$ -Si<Mn> // ФТП. Т. 14. Вып. 11. 1980. С. 2247–2249, 1028–1035.

Поступила 10.03.03

## Summary

In this work is given results of researches on study of magneto-resistive effect in compensated silicon doped by manganese. In samples Si<B,Mn>  $p$ -type was revealed abnormal magneto-resistance. The dependence of magneto-resistance size on degree of compensation of samples was investigated at room temperature.