

# ВЛИЯНИЕ КОНЦЕНТРАЦИИ ЭЛЕКТРОАКТИВНЫХ АТОМОВ МАРГАНЦА НА ГАЛЬВАНОМАГНИТНЫЕ СВОЙСТВА КРЕМНИЯ В УСЛОВИЯХ СИЛЬНОЙ КОМПЕНСАЦИИ

Саъдуллаев А.Б.<sup>1</sup>, Курбонов Н.А.<sup>2</sup> Email: Sadullaev1133@scientifictext.ru

<sup>1</sup>Саъдуллаев Алоvidдин Бобакулович - кандидат физико-математических наук, доцент;

<sup>2</sup>Курбонов Нажмиддин Абдиhamитович - старший преподаватель,  
кафедра электроэнергетики,  
энергетический факультет,

Каршинский инженерно-экономический институт, г. Карши, Республика Узбекистан

**Аннотация:** в статье рассматривается исследование особенностей гальваномагнитных свойств кремния легированным марганцем в условиях сильной компенсации и установлены возможности управления, значения и знак магнетосопротивления образцов  $p\text{-Si}\langle B, Mn \rangle$ , управляя концентрацией электроактивных атомов марганца, и определена область существования положительного и отрицательного магнетосопротивления, а также предложена нанокластерная модель, позволяющая объяснить природу гальваномагнитных явлений в сильнокомпенсированном кремнии.

**Ключевые слова:** сильнокомпенсированный кремний, отрицательное и положительное магнетосопротивление, концентрация электроактивных атомов, напряжённость магнитного поля.

## INFLUENCE OF THE CONCENTRATION OF ELECTROACTIVE MANGANESE ATOMS ON THE GALVANOMAGNETIC PROPERTIES OF SILICON IN HIGH COMPENSATION

Sadullaev A.B.<sup>1</sup>, Kurbonov N.A.<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Sadullaev Aloviddin Bobakulovich – Candidate of Physical and Mathematical Sciences, Associate Professor;

<sup>2</sup>Kurbonov Najmiddin Abdihamitovich - Senior Teacher of the Department of Electricity, Energy Department, Karshi Engineering-Economic Institute, Karshi, Republic of Uzbekistan

**Abstract:** the article considers the study of the peculiarities of the galvanomagnetic properties of silicon doped with manganese in high compensation and established management capabilities values and sign the magnetoresistance of the samples  $p\text{-Si}\langle B, Mn \rangle$  controlling the concentration of electroactive manganese atoms and defined the region of existence of positive and negative magnetoresistance, and the proposed nanocluster model can explain the nature of galvanomagnetic phenomena in silicon Strongly compensated.

**Keywords:** strongly compensated silicon, negative and positive magnetoresistance, the concentration of electrically active atoms, the magnetic field strength.

УДК 537.5

В условиях сильной компенсации в кремнии, легированном марганцем  $\text{Si}\langle B, Mn \rangle$ , где концентрация равновесных носителей тока  $n, p$  становится в сотни тысяч или миллионы раз меньше, чем концентрация ионизованных примесных атомов  $N_B^-, N_{Mn}^+$  в кристаллической решётке система находится в крайне неравновесном состоянии. Воздействие малейших внешних факторов (температуры, освещённости, магнитного поля и т.д.) приводит к существенному изменению условий взаимодействия дефектов и носителей тока, в результате наблюдается ряд интересных и новых физических явлений, природа которых до конца ещё не изучена [1 - 3].

В связи с этим целью данной работы являлось исследование влияния концентрации электроактивных атомов марганца на гальваномагнитные свойства кремния в условиях сильной компенсации, а также определение области существования магнетосопротивления в зависимости от электрофизических параметров материала.

В качестве объекта исследования был выбран монокристаллический кремний  $\text{Si}\langle B \rangle$ , компенсированный марганцем. Такой выбор материала и компенсирующих примесей продиктован тем, что с одной стороны атомы марганца в кремнии могут находиться в кристаллической решетке во многозарядовых ( $Mn^0, Mn^+, Mn^{++}$ ) состояниях, которого являются очувствляющие центры, а с другой стороны технология получения компенсированного кремния, легированного марганцем, достаточно хорошо отработана [1 - 3], что и позволило получить материал с различной концентрацией электроактивных атомов марганца и воспроизводимыми, стабильными параметрами, а также обеспечило получение достоверных результатов. Для исследования в качестве исходного материала был использован монокристаллический кремний  $p$  - типа проводимости с удельным сопротивлением  $\rho = 1 \text{ Ом} \cdot \text{см}$ . Концентрация атомов бора в данном материале составила  $N_B = 2 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$ , почти равный

максимальной предельной растворимости марганца в кремнии. Из каждого образца было изготовлено по 10 образцов с одинаковыми геометрическими размерами. После диффузии марганца из газовой фазы, нами получены сильнокомпенсированные образцы p-Si<B,Mn> с различной концентрацией электроактивных атомов марганца p- и n- типов проводимости.

Результаты исследования влияние напряжённости магнитного поля на относительное изменение удельного сопротивления сильнокомпенсированных образцов Si<B,Mn> с удельным сопротивлением  $\rho = 2 \cdot 10^2 \text{ Ом см}$  показали, что с ростом напряжённости магнитного поля увеличивается сопротивление материала, т.е. наблюдается небольшое положительное магнитосопротивление характеризовавшие и близка к квадратичной зависимости от напряжённости магнитного поля  $\frac{\Delta\rho}{\rho} \sim H^2$  (Рис. 1, крив. 3).

В образцах с удельным сопротивлением  $\rho = 10^3 \text{ Ом см}$ , с ростом напряжённости магнитного поля удельное сопротивление образцов не возрастало, а наоборот уменьшалось, т.е. имело место отрицательное магнитосопротивление (Рис. 1, крив. 5). При слабых магнитных полях в интервале напряжённости магнитного поля  $H = 0 \div 10 \text{ кЭрс}$ , зависимость отрицательного магнитосопротивления от напряжённости магнитного поля описывается  $\frac{\Delta\rho}{\rho} \sim H$ , с дальнейшим ростом напряжённости магнитного поля в интервале  $H = 10 \div 20 \text{ кЭрс}$ , характер зависимости  $\frac{\Delta\rho}{\rho}$  от H изменяется ближе к квадратичной  $\frac{\Delta\rho}{\rho} \sim H^2$ . В образцах с удельным сопротивлением  $\rho = (5 \div 6) \cdot 10^3 \text{ Ом см}$  эта зависимость более чётко проявляется и наблюдается максимальное значение отрицательного магнитосопротивления (Рис. 1, крив. 6). С дальнейшим ростом удельного сопротивления образцов Si<B,Mn> значение отрицательного магнитосопротивления уменьшается, а характер зависимости  $\frac{\Delta\rho}{\rho}$  от H остаётся не изменным (Рис. 1, крив. 4).

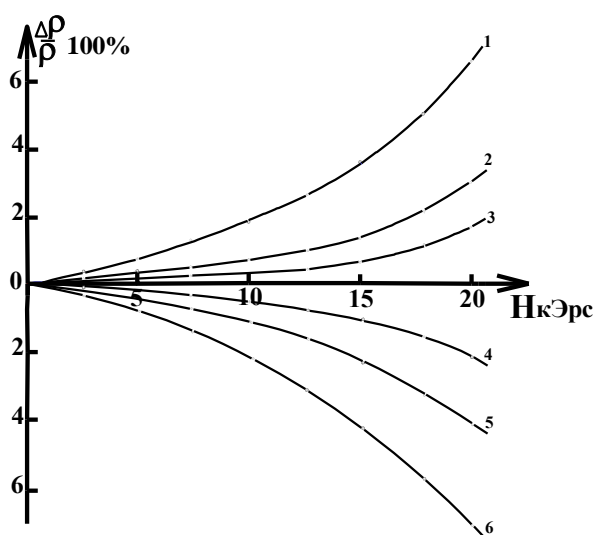


Рис. 1. Зависимость изменения магнитосопротивления от напряжённости магнитного поля при различных значениях концентрации электроактивных атомов марганца

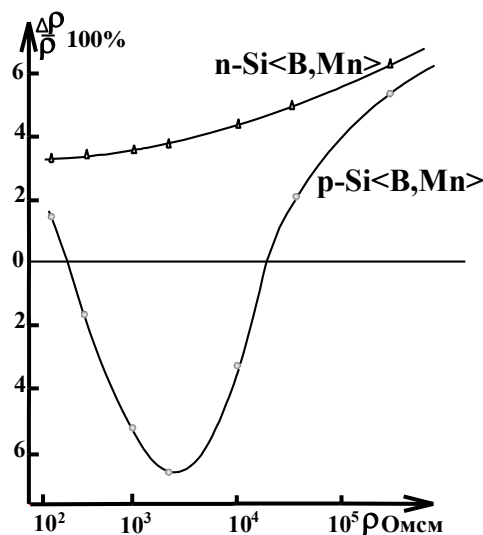


Рис. 2. Зависимость изменения магнитосопротивления от концентрации электроактивных атомов марганца

В образцах с удельным сопротивлением  $\rho = 5 \cdot 10^4 \text{ Ом см}$  с ростом напряжённости магнитного поля удельное сопротивление увеличивается, т.е. опять наблюдается положительное магнитосопротивление (Рис. 1, крив. 2). С дальнейшим ростом удельного сопротивления образцов p-Si<B,Mn> значение положительного магнитосопротивления увеличивается в зависимости от напряжённости магнитного поля (Рис. 1, крив. 1).

Известно, что в компенсированных образцах p-Si<B,Mn> с ростом концентрации электроактивных компенсирующих примесей марганца, удельное сопротивление материала увеличивается за счёт компенсации атомов бора. Поэтому для удобства на рисунке 2 представлены относительное изменение удельных сопротивлений этих же образцов с изменением концентрации электроактивных атомов при постоянном значений  $H=20 \text{ кЭрс}$  напряжённости магнитного поля. Как видно из рисунка, в образцах n-Si<B,Mn>, т.е. в перекомпенсированных образцах независимо от концентрации электроактивных атомов марганца, всегда наблюдается небольшое положительное магнитосопротивление, что также имеет место в контрольных не компенсированных материалах. В образцах p-Si<B,Mn> с удельным сопротивлением

$\rho \approx 10^2 \text{ Ом} \cdot \text{см}$  наблюдается небольшое положительное магнитосопротивление, с ростом концентрации электроактивных атомов марганца значение положительного магнитосопротивления уменьшается и начиная с концентрации соответствующей удельному сопротивлению  $\rho \approx 5 \cdot 10^2 \text{ Ом} \cdot \text{см}$ , имеет место отрицательное магнитосопротивление. Значение отрицательного магнитосопротивления растёт с ростом концентрации электроактивных атомов марганца и достигает своего максимального значения в образцах с удельным сопротивлением  $\rho = (5 \div 6) \cdot 10^3 \text{ Ом} \cdot \text{см}$ , а дальнейшее увеличение концентрации электроактивных атомов марганца приводит к уменьшению значения отрицательного магнитосопротивления. Начиная с концентрации электроактивных атомов марганца соответствующей удельному сопротивлению  $\rho \approx 2 \cdot 10^4 \text{ Ом} \cdot \text{см}$ , опять наблюдается положительное магнитосопротивление. Таким образом, в образцах p-Si<B,Mn> с изменением концентрации электроактивных атомов марганца, не только можно управлять значениями, но и знаком магнитосопротивления.

Известно, что магнитосопротивление наблюдалось во многих высокочувствительных полупроводниковых материалах [1 - 3], однако положительное и отрицательное магнитосопротивление совместно не обнаружено ни в одном полупроводниковом материале. Также следует отметить, что невозможно объяснить такое большое изменение значения и знак магнетосопротивления с малейшим изменением концентрации электроактивных атомов марганца, так как в образцах p-Si<B,Mn> с удельным сопротивлением  $\rho \approx 10^2 \text{ Ом} \cdot \text{см}$  и  $\rho \approx 10^5 \text{ Ом} \cdot \text{см}$  концентрация электроактивных атомов марганца всего лишь отличается на 1% и составляет  $N_{Mn} = 2 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$ .

Полученные нами экспериментальные данные позволяют сделать вывод о том, что примесные атомы марганца в кристаллической решётке кремния в зависимости от концентрации или при изменении внешних факторов имеют различные состояния ( $\text{Mn}^0$ ,  $\text{Mn}^+$ ,  $(\text{MnB})^0$ ,  $(\text{MnB})^+$ ,  $(\text{MnB})_2^{+(1-4)}$ ,  $(\text{MnB})_4^{+(1-8)}$ ) и происходят непрерывные реакции между этими состояниями. В определённых условиях некоторые из этих центров будут более активно проявляться, а их концентрация в основном будет определяться концентрацией электроактивных примесей марганца и условиями эксперимента.

#### *Список литературы / References*

1. Бахадырханов М.К., Зикриллаев Н.Ф., Хамидов А., Саъдуллаев А.Б. О концентрации электроактивных атомов элементов переходных групп в полупроводниках. UZBEK JOURNAL OF PHYSIKS. Volume 2. Number 3, 2000. P. 221 - 225.
2. Zikrillaev N.F., Sadullaev A.B. Power spectra of impurity in semiconductors in the condition of strong compensation. SSP-2004. 8-th International Conference SOLED STATE PHYSICS. August 23 - 26, 2004, Almaty. Kazakhstan Abstracts Almaty-2004. Pp-254-255.
3. Бахадырханов М.К., Зикриллаев Н.Ф., Аюнов К.С. Спектральная область существования автоколебаний тока в кремнии, легированном марганцем. ЖТФ. 2006. Т.76. В. 9. С. 128 - 129.
4. Саъдуллаев А.Б. Особенности комплексообразования между примесными атомами марганца и кислорода в кремнии. «Молодой учёный». № 12, 2014. С. 50 - 52.
5. Никитин С.А. Гигантское магнитосопротивление. Соросовский образовательный журнал, 2004. Т. 8. № 2.
6. Борисенко И.В., Овсянников Г.А. Магнитосопротивление и проводимость бикристаллических контактов из манганитов. ФТТ 51, 2009. В. 2. С. 292 - 296.