

Влияние атомов марганца на магнитные свойства кремния

О. Э. Саттаров^{а*}, А. Мавлянов^б, А. Ан^а

^аАлмалыкский филиал Ташкентского государственного технического университета,
г. Алмалык, 110100, Узбекистан

^бТашкентский государственный технический университет,
г. Ташкент, 100095, Узбекистан

*e-mail: sattarov_ol@mail.ru

Поступила в редакцию 29.12.2021

После доработки 10.02.2022

Принята к публикации 15.02.2022

Показана возможность управления состоянием атомов марганца в решетке кремния, что позволяет варьировать состояние и характер магнитосопротивления материала. Установлены закономерности изменения магнитосопротивления в кремнии с атомами марганца (одиночными атомами и кластерами) в зависимости от температуры, освещения и электрического поля.

Ключевые слова: магнитосопротивления, кластеры атомов марганца, отрицательное магнитосопротивление, кремний, проводимость

УДК 621.315.592

<https://doi.org/10.52577/eom.2022.58.4.46>

ВВЕДЕНИЕ

В отличие от других примесных атомов элементов переходных групп, атомы марганца в решетке кремния могут находиться как в атомарном, так и в кластерном состоянии [1, 2]. Кластерное состояние атомов марганца формируется при определенных термодинамических условиях легирования [3, 4]. Кластеры состоят из четырех атомов марганца, находящихся в ближайших междоузельных положениях решетки вокруг отрицательно заряженного атома бора [5–7]. Поэтому, управляя соотношением концентрации введенных атомов марганца и концентрации атомов бора, можно управлять концентрацией кластеров. Атомы марганца, введенные в исходный кремний *n*-типа, в основном находятся в атомарном состоянии. Поскольку атомы марганца являются парамагнитными примесями ($3d^5 4s^2$), обладают спином $s = 5/2$ в атомарном состоянии, в кластерном состоянии могут иметь спин до $s = (5/2) \times 4 = 10$. Поэтому можно предполагать, что, управляя соотношением концентрации кластеров и атомарным состоянием атомов марганца в решетке кремния можно управлять магнитными свойствами кремния.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

В связи с этим цель данной работы исследование магнитных свойств кремния с различным состоянием атомов марганца в кремнии. При этом были изготовлены три партии образцов на основе монокристаллического кремния: первая

партия на основе кремния *p*-типа КДБ-3, вторая партия КДБ-10 и третья партия на основе кремния *n*-типа КЭФ-100. Размеры образцов $8 \times 3 \times 2$ мм³. Подготовка к диффузии проводилась в одинаковых условиях по низкотемпературной диффузионной технологии введения примесей в кремний с конечной температурой $T = 1080$ °С, время диффузии 1,5 часа [8, 9]. Измерение электрических параметров после диффузии проводилось методом с применением эффекта Холла, их результаты приведены в таблице.

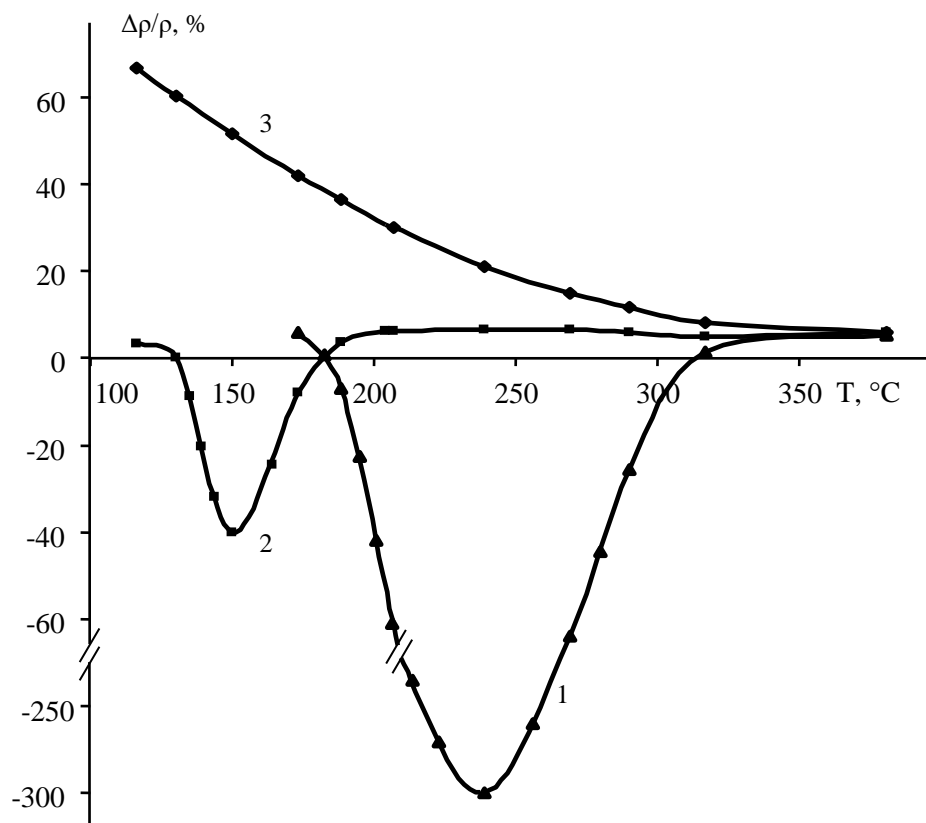
Из таблицы видно, что были получены компенсированные и перекомпенсированные образцы, а также легированный марганцем кремний *n*-типа. Эти данные показывают, что атомы Mn в Si действуют как донорные примеси.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

На основе этих результатов можно предполагать, что в компенсированных образцах практически все атомы марганца участвуют в формировании кластеров, а в перекомпенсированных образцах около 60% атомов марганца находятся в кластере, а остальные – в атомарном состоянии. В образцах *n*-типа практически все атомы марганца находятся в атомарном состоянии. Это предположение подтвердилось исследованием состояния атомов марганца в этих образцах методом электронного парамагнитного резонанса (ЭПР). В первой партии образцов наблюдается четкий интенсивный спектр, состоявший из 21 тонкой расщепленной линии, связанной с кластерами атомов марганца [10], а во второй партии образцов заметны

Таблица. Параметры образцов полученных по технологии низкотемпературной диффузии примесей в кремнии

Образцы	ρ , Ом·см	μ , см ² /В·с	n, p , см ⁻³	Тип проводимости
Первая партия	$(3\div 4)\times 10^3$	90	$2,3\times 10^{13}$	<i>p</i> -тип
Вторая партия	$(3\div 5)\times 10^3$	1050	$1,98\times 10^{12}$	<i>n</i> -тип
Третья партия	$(2\div 3,5)\times 10^3$	1100	$1,89\times 10^{12}$	<i>n</i> -тип

**Рис 1.** Магнитосопротивления в кремнии, легированном марганцем, при $H = 2\text{Тл}$: 1 – образцы компенсированные; 2 – перекомпенсированные; 3 – кремний *n*-типа, легированный марганцем.

слабые искаженные спектры, связанные как с кластерами, так и с атомарным состоянием атомов марганца. В третьей партии образцов имеются только четкие линии спектра ЭПР, связанные с атомарным состоянием атомов марганца [10, 11].

Магнитные свойства всех трех партий образцов исследовались при одинаковых условиях. На рис. 1 представлена температурная зависимость магнитосопротивления этих образцов. Как видно, в перекомпенсированных образцах при комнатной температуре наблюдается аномально большое отрицательное магнитосопротивление (ОМС), $(\frac{\Delta\rho}{\rho}) \sim 100\%$,

значение которого с понижением температуры увеличивается и достигает своего максимального значения при $T = 250\text{ К}$. Дальнейшее понижение температуры приводит к уменьшению ОМС, и при $T = 180\text{ К}$ происходит инверсия значения магнитосопротивления, то есть ОМС переходит в положительное магнито-

сопротивление (ПМС). Значение ПМС при этом составляет $\frac{\Delta\rho}{\rho} = (5-6)\%$ и слабо зависит от ρ

температуры. Повышение температуры выше комнатной в этих образцах, также приводит к уменьшению ОМС, и при $T = (345\div 350)\text{ К}$ происходит опять инверсия знака магнитосопротивления, то есть имеется небольшое ПМС. Таким образом, в компенсированных образцах наблюдается не только высокое ОМС, но в интервале температур $T = 180\text{ К} \div 350\text{ К}$ имеет место двойная инверсия знака магнитосопротивления (МС) (рис. 1, кривая 1).

В образцах второй партии при комнатной температуре наблюдается небольшое ПМС. С понижением температуры значение ПМС уменьшается, и при $T = 180\text{ К}$ происходит инверсия знака МС, то есть имеет место ОМС, значение которого с понижением температуры увеличивается и достигает своего максимального значения при $T = (150\div 155)\text{ К}$, затем с понижением температуры значение ОМС уменьшается,

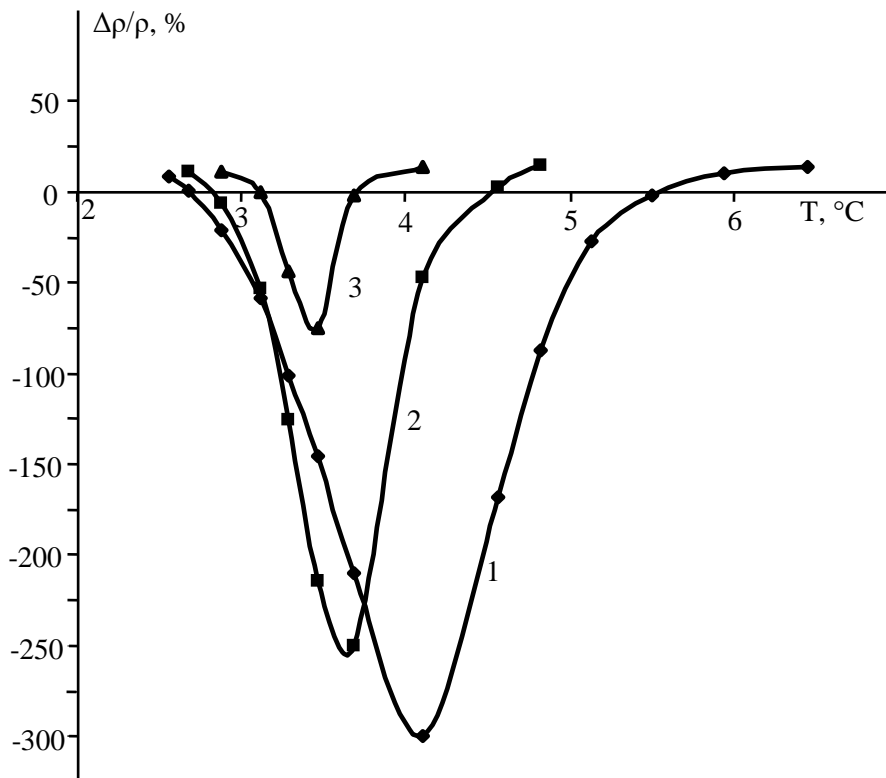


Рис. 2. Зависимость магнитосопротивления от температуры в образцах $\text{Si}\langle\text{B,Mn}\rangle$ с $\rho = 4 \times 10^3$ Ом-см, при $H = 2$ Тл; 1 – темновая; 2 – $I = 10$ Лк; 3 – $I = 40$ Лк.

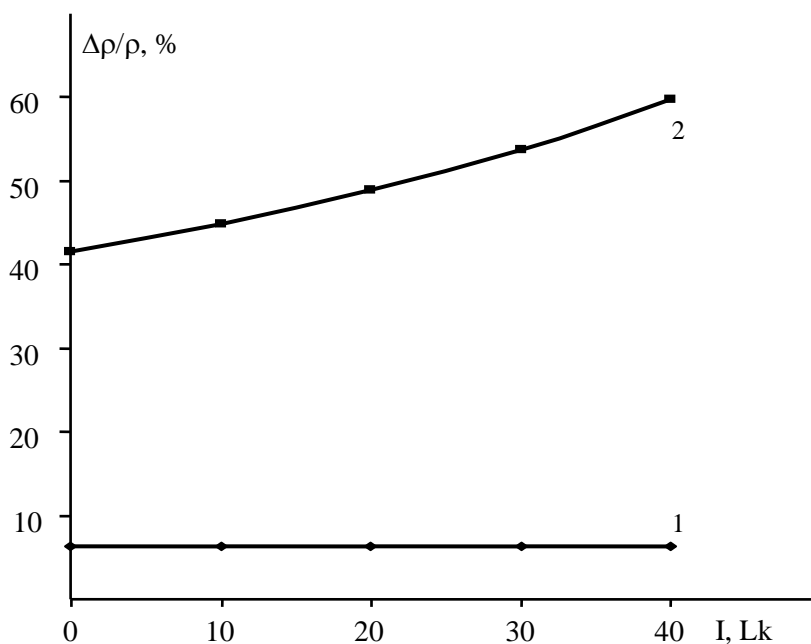


Рис. 3. Зависимость магнитосопротивления от интенсивности фонового освещения при температуре $T = 100$ К: (1 – перекомпенсированный $\text{Si}\langle\text{B,Mn}\rangle$); (2 – кремний n -типа, легированный марганцем).

а при $T \approx 100$ К происходит опять инверсия знака МС и имеет место небольшое ПМС, значение которого слабо зависит от температуры (рис. 1, кривая 2).

Следует отметить, что хотя в этих образцах характер зависимости МС такой же, как у образцов первой партии, однако величина ОМС значительно меньше, температурная область существования ОМС заметно сужается, а также T_{max} смещается в сторону низких температур. В образцах третьей партии при комнатной

температуре наблюдается только небольшое ПМС. С понижением температуры значение ПМС в этих образцах непрерывно растет, и при $T = 100$ К оно имеет достаточно большое значение $\frac{\Delta\rho}{\rho} = 60\%$ (рис. 1, кривая 3). Таким

образом, температурная зависимость МС в этих образцах существенно отличается от образцов первой и второй партий.

Исследование влияния освещенности фоновым светом на характер МС исследуемых

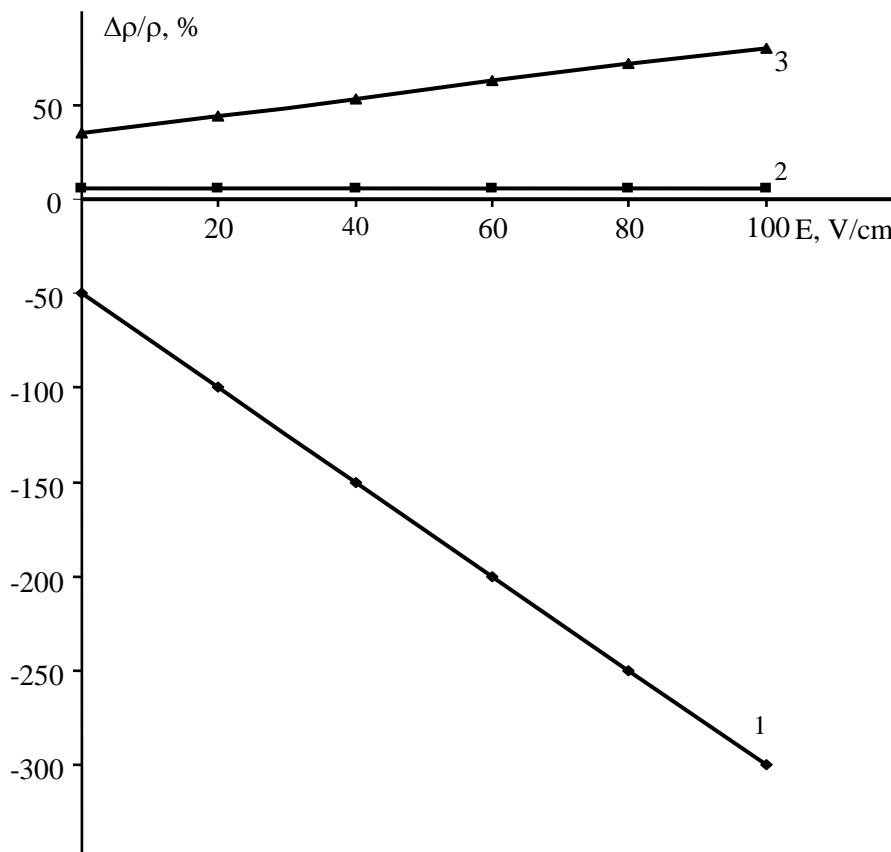


Рис. 4. Зависимость магнитосопротивления от электрического поля в темноте, при температуре: $T = 235$ К, $H = 2$ Тл: 1 – компенсированные образцы; 2 – перекомпенсированные; 3 – кремний n -типа, легированный марганцем.

образцов показало, что в образцах первой партии рост интенсивности освещения приводит к монотонному уменьшению ОМС и к существенному сужению температурной области существования ОМС (рис. 2). При более высоких интенсивностях освещения $I = 60$ Лк происходит инверсия знака МС, то есть наблюдается только ПМС.

На рис. 3 представлено влияние интенсивности освещения на МС второй и третьей партий образцов при $T = 100$ К. Как видно, в образцах второй партии при освещении ОМС исчезает и наблюдается только небольшое ПМС, значение которого практически не зависит от интенсивности освещения (рис. 3, кривая 1). В то же время в образцах третьей партии с ростом интенсивности света значение ПМС слабо, но монотонно растет (рис. 3, кривая 2).

Исследования показали, что в образцах первой партии с ростом электрического поля значение ОМС растет почти линейно (рис. 4, кривая 1). Такая зависимость имеет место в той температурной области, где наблюдается ОМС.

Увеличение электрического поля уменьшает значение ОМС и при $E = (80 \div 90)$ В/см происходит инверсия знака магнитосопротивления в образцах второй партии. В отличие от первой и второй партий в образцах третьей

партии с ростом значения электрического поля ПМС слабо, но монотонно увеличивается.

ВЫВОДЫ

Таким образом, полученные экспериментальные результаты показывают, что, управляя состоянием атомов марганца в решетке кремния можно не только изменять величину МС, но и характер магнитосопротивления: температурную зависимость, зависимость от интенсивности освещения и электрического поля. Это означает, что введение атомов марганца в решетку кремния существенно расширяет функциональные возможности материала для спинтроники и создания новых фотомагнитных приборов. Полученные результаты позволяют утверждать, что эффект ОМС в основном связан с кластерным состоянием атомов марганца в решетке кремния, а атомарное состояние атомов марганца стимулирует ПМС.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Фистуль, В.И., *Физика и химия твердого тела*, т. 1, М.: Металлургия, 1995. 480 с.

2. Мильвидский, М.Г., Чалдышев, В.В., Наноразмерные атомные кластеры в полупроводниках – новый подход к формированию свойств материалов, ФТП, 1998, т. 32, № 5, с. 513.
3. Суздальев И.П., *Нанотехнология: Физико-химия нанокластеров, наноструктур и наноматериалов*, М.: Либроком, 2009. 592 с.
4. Бахадырханов, М.К., Мавлонов, Г.Х., Илиев Х.М., Управление магнитными свойствами кремния с нанокластерами атомов марганца, *Журнал технической физики*, 2014, т. 84, № 10, с. 139.
5. Ludwig, G.W., Woodbury, H.H. and Carlson, R.O., *J. Phys. Chem. Sol.*, 1959, vol. 8, p. 490.
6. Kreissl, J. and Gehlhoff, W., *Phys. Stat. Sol. (b)*, 1988, vol. 145, p. 609.
7. Бахадырханов, М.К., Саттаров, О.Э., Мавлонов, Г.Х., Илиев, Х.М., и др., Фотопроводимость кремния с многозарядными кластерами атомов марганца [Mn]₄, *ЭОМ*, 2010, № 3, с. 94.
8. Абдурахманов, Б.А., Аюпов, К.С., Бахадырханов, М.К., Илиев, Х.М., и др., Низкотемпературная диффузия примесей в кремнии, Докл. АН Республики Узбекистан, 2010, № 3, с. 23.
9. Bakhadyrkhanov, M.K., Mavlonov, G.Kh., Isamov, S.B., Iliev, Kh.M., et al., Transport properties of silicon doped with manganese via low temperature diffusion, *Inorg. Mater.*, 2011, vol. 47, no. 5, p. 479.
10. Аскарлов, Ш.И., Бахадирханов, М.К., Мастеров, В.Ф., Штельмах, В.Ф., Исследование методом ЭПР межпримесного взаимодействия серы и марганца в кремнии, ФТП, 1982, т. 16, № 7, с. 1308.
11. Бахадырханов, М.К., Мавлонов Г.Х., Илиев, Х.М., Аюпов, К.С., и др., Особенности магнетосопротивления в перекомпенсированном кремнии, легированном марганцем, ФТП, 2014, т. 48, № 8, с. 1014.

Summary

The authors in the present paper suggest that it is possible to manipulate the state of manganese atoms in the silicon lattice, thus significantly changing the state and character of the magnetic resistance of the studied silicon sample. The authors have been able to determine how magnetic resistance in silicon with a varying number of manganese atoms (single atomic or aggregates) changes as a function of temperature, light, and electric field.

Keywords: magnetoresistance, clusters of manganese atoms, negative magnetoresistance, silicon, conductivity