

МАГНИТНЫЕ СВОЙСТВА ЛЕГИРОВАННОГО МАРГАНЦЕМ КРЕМНИЯ**Маджитов М.Х.**

Маджитов М.Х. – соискатель. Ташкентский государственный технический университет им.И.А.Каримова. г.Ташкент, Республика Узбекистан.

Аннотация: Явление большого отрицательного магнитосопротивления наблюдалось при комнатной температуре за счет формирования магнитных нанокластеров атомов, легированных марганцем, в кремнии путем низкотемпературной диффузии. Показано, что величиной отрицательного магнитосопротивления можно управлять, контролируя концентрацию нанокластеров марганца в кремнии.

Ключевые слова: кремний, магнитный полупроводник, нанокластеры марганец, магнитное сопротивление.

Abstract: A large negative magnetoresistance phenomenon has been observed at room temperature by forming magnetic nanoclusters of manganese doped atoms in silicon by low-temperature diffusion. It has been shown that the negative magnetoresistance value can be controlled by controlling the concentration of manganese nanoclusters in silicon.

Keywords: silicon, magnetic semiconductor, manganese nanoclusters, magnetic resistance.

Разработка технологии получения новых магнитных полупроводников и исследование их свойств позволяет не только дальше продолжать развитие научных направлений спинтроника, фотоманетика, магнитооптика и открывать новые физические явления, связанные с магнитными свойствами полупроводников, но и существенно расширить область применения современной электроники, а также более глубоко понять происходящие физические процессы.

При этом особый научный и практический интерес представляет создание и исследование магнитных нанокластеров в кристаллической матрице кремния, не нарушая его фазовый и химический состав. Такой интерес важен тем, что с одной стороны используемый базовый материал - кремний, является основным материалом для современной электроники, а это существенно ускоряет практическое применение полученных результатов на основе данного материала. С другой стороны создание магнитных нанокластеров с управляемыми параметрами и концентрацией позволяет раскрыть новые, еще не изученные грани магнитных свойств кремния с наноструктурами и возможности их использования при разработке и создании принципиально нового поколения электромагнитных и фотоманетических приборов.

Управление магнитными свойствами полупроводников за счёт формирования магнитных нанокластеров парамагнитных примесных атомов в кристаллической решетке является новым научным направлением.

В этом плане представляет большой интерес исследование поведения примесных атомов марганца в кремнии. Такой интерес связан, во-первых с тем, что атомы марганца являются парамагнитными примесями который обладает электронной структурой $3d^5 4s^2$ с максимальным спином $S = \frac{5}{2}$, во-вторых атом марганца в состоянии $Mn^{++}(3d^5)$ имеет достаточно маленький ионный радиус ($0,96 \text{ \AA}$), который меньше чем междоузельное пространство Si ($1,77 \text{ \AA}$). Поэтому атомы марганца в кремнии находятся в основном в междоузлиях и имеют достаточно большой коэффициент диффузии. Эти основные параметры атомов марганца в решетке кремния, по-видимому, и стимулируют формирование кластеров. Действительно как было показано в работах [1-3], с помощью метода электронного парамагнитного резонанса (ЭПР), при определенных условиях легирования в решетке кремния могут образовываться кластеры, состоящие из 4х атомов марганца находящихся в соседних ближайших эквивалентных междоузлиях.

Развитие нанотехнологии и особенно разработка технологии формирования нанокластеров примесных атомов с управляемой структурой, составом и их распределением в

объеме кристалла подсказывает необходимость осуществления диффузии примесных атомов в основном по междоузельному механизму. Так как только диффузия по междоузлиям позволяет управлять состоянием примесных атомов в решетке и их взаимодействием между собой и дефектами, а главное при определенных термодинамических условиях позволяет образовывать нанокластеры с различной структурой и составом [4-6,12]. Формирование кластеров примесных атома в узлах решетки ограничивается не только их коэффициентом диффузии, но и одновременным образованием достаточного числа вакансий. Когда примесные атомы находятся в междоузлах, процесс существенно ускоряется за счет довольно большого коэффициента диффузии и возможностью формирования кластеров в междоузлиях с определенным состоянием и структурой, что не требует существенной перестройки кристаллической решетки и достаточно высокой энергии [7,10].

Одним из реальных путей осуществления диффузии по междоузлиям - это проведение низкотемпературной и поэтапной диффузии. Под низкотемпературной диффузией необходимо понимать такой процесс диффузии, при котором термически равновесная концентрация вакансий (N_v) в решетке должна быть существенно меньше, чем концентрация введенных примесных атомов (N) в решетку. По-другому это означает, что концентрация примесных атомов в узлах или комплексах (N_s) с вакансиями должна быть существенно меньше, чем концентрация примесных атомов в междоузлиях (N_i).

$$N \cong N_i \gg N_s = N_v$$

С другой стороны температура диффузии должна быть достаточна, чтобы примесные атомы могли перескочить из одного междоузельного состояния в другое, преодолев при этом существующий потенциальный барьер, т.е. энергию активации диффузии E_a .

В условиях низкотемпературной диффузии примесных атомов марганца в кремний не только возможно получение образцов без эрозии поверхности, без образования силицидов в приповерхностной области, но и возможно равномерное легирование образца с необходимой концентрацией и заданной глубиной.

Как показали результаты исследований, в образцах p -Si<B,Mn> с положением уровня Ферми в пределах $E_F = E_V + (0,38 \div 0,45)$ эВ при $T=300$ К, полученных в условиях низкотемпературной диффузии, четко наблюдаются сверхтонкие спектры ЭПР, состоящие из 21 линии (рис. 1.) характерные для нанокластеров содержащих в своем составе четыре атома марганца [8, 9,11,13].

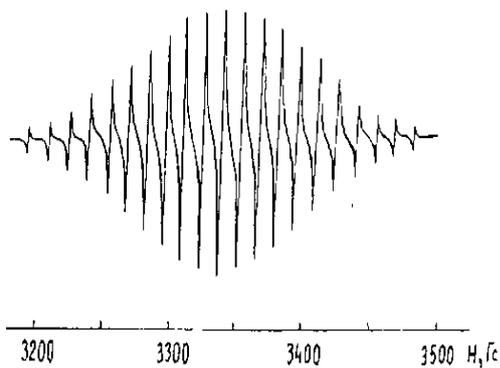


Рис. 1. Спектр ЭПР $[Mn]_4$ в кремнии.

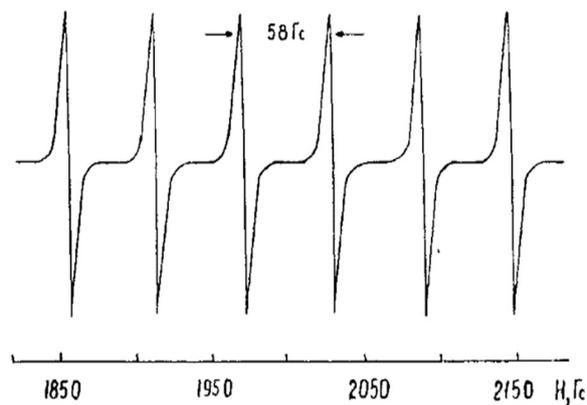
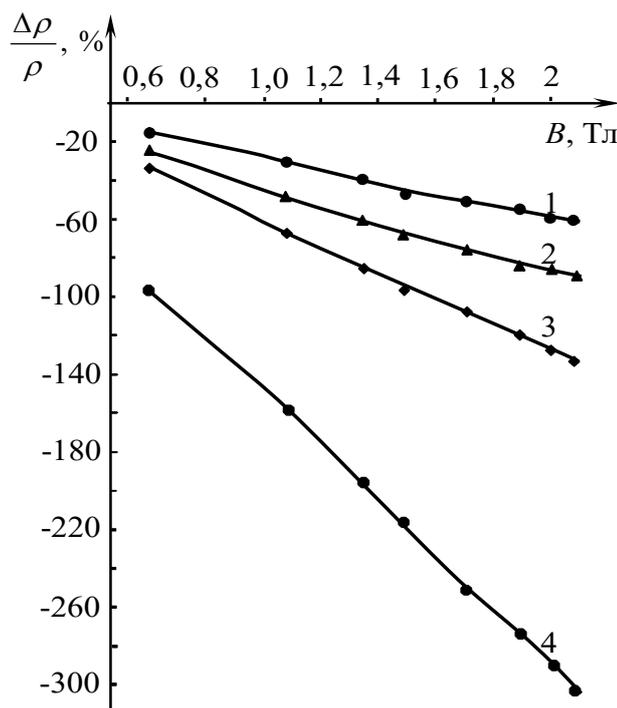


Рис. 2. Спектр ЭПР состояния атомов марганца Mn^{++} в кремнии.

В образцах легированных по обычной технологии были получены образцы Si<B,Mn> p -типа проводимости с аналогичными параметрами (удельными сопротивлениями), такими же, как и у образцов, полученных по новой технологии, где четко наблюдались нанокластеры атомов марганца, однако в этих образцах Si<B,Mn> независимо от их параметров ЭПР не показал наличие нанокластеров атомов марганца, а также в перекомпенсированных образцах Si<B,Mn> n -типа, полученных по новой технологии не зависимо от положения уровня Ферми

в них. Наблюдаемые в данных случаях спектры ЭПР связаны с одиночным состоянием атомов марганца $(Mn)^{++}(3d^5 4s^0)$ (рис. 2.).

Структура нанокластера состоит из четырех положительно заряженных атомов марганца, которые находятся в ближайших эквивалентных междуузлиях вокруг отрицательно заряженного атома бора. Нанокластеры атомов марганца могут действовать как магнитные центры, так как кластеры состоят из четырех атомов марганца со спинами $S=5/2$ и суммарным спином $4S=10$, т.е. они должны действовать как мощный магнитный момент. Для исследования электрофизических свойств полученного материала использовался метод эффекта Холла. Действительно, Холловское падение напряжения и Холловская подвижность носителей заряда в этих образцах значительно отличается по сравнению с перекомпенсированных образцах, а также в образцах *n*-кремния легированных Mn, по новой разработанной нами технологии.



При $N(Mn)_4=2 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-3}$ $\alpha=28 \text{ \%}/\text{Тл}$
 При $N(Mn)_4=10^{15} \text{ см}^{-3}$ $\alpha=150 \text{ \%}/\text{Тл}$

Рис. 3. Зависимость МС от магнитного поля в образцах с различной концентрацией магнитных нанокластеров при $T=300 \text{ К}$, $E=100 \text{ В}/\text{см}$: 1- $N(Mn)_4=2 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-3}$, 2- $N(Mn)_4=2 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-3}$, 3- $N(Mn)_4=5 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-3}$, 4- $N(Mn)_4=10^{15} \text{ см}^{-3}$.

Магнитосопротивления (МС) в образцах *p*-Si<B,Mn> с магнитными нанокластерами $[Mn]_4$ исследовались при комнатной температуре при поперечном ($B \perp I$) направлении магнитного поля. Напряженность магнитного поля изменялась в интервале $B=0 \div 2 \text{ Тл}$, т.е выполнялось условие слабого магнитного поля. Результаты исследования магнитосопротивления в кремнии с магнитными нанокластерами атомов марганца представлена на рис. 3.

Как видно из рисунка, с ростом концентрации нанокластеров, значение ОМС существенно увеличивается. В образцах с концентрацией нанокластеров $N=10^{15} \text{ см}^{-3}$ при комнатной температуре, при $E=100 \text{ В}/\text{см}$ получается гигантски большое отрицательное магнитосопротивления (ОМС) $\Delta\rho/\rho \sim 300 \text{ \%}$, а чувствительность магнитного поля составляет $\alpha=150 \text{ \%}/\text{Тл}$.

Эти результаты не только явно демонстрируют, что появление ОМС и его природа в таких образцах непосредственно связана с наличием нанокластеров атомов марганца в

решетке, но и с возможностью управления значением ОМС в широком интервале путем изменения концентрации нанокластеров.

Установлено, что с ростом концентрации нанокластеров в интервале $2 \cdot 10^{13} \div 10^{15} \text{ см}^{-3}$, при одинаковых условиях эксперимента, значение ОМС увеличивается в $8 \div 10$ раз, а чувствительность магнитного поля повышается от $\alpha=28 \text{ \%}/\text{Тл}$ до $\alpha=150 \text{ \%}/\text{Тл}$.

ЛИТЕРАТУРА

1. Ludwig G.W., Woodbury H.H., Carlson R.O. Spin Resonance of Deep Level Impurities in Germanium and Silicon // J.Phys.Chem. Sol., 1959. V.8. P.490.
2. Фистуль В.И., Казакова В.М., Бобриков Ю.А., Рябцев А.В., Абдурахманов К.П., Зайнабидинов С., Камиллов Т.С., Утамурадова Ш.Б.. О состоянии примесных ионов марганца в кремнии // Физика и техника полупроводников. – Санкт–Петербург, 1982.– Т. 16.– В.5– С. 939-941.
3. Kreissl J., Gehlhoff W. Electron Paramagnetic Resonance of the M_4^0 Cluster in Silicon // phys.stat.sol. 1988.– V.145 (b).– P. 609-616.
4. Алексеенко В.В. О механизме диффузии атомов в конденсированных средах // ФТТ. - Т. 50.– В.10.– С. 1775-1778.
5. Бахадирханов М.К., Аюпов К.С., Арзукулов Э.У., Сражев С.Н., Тошбоев Т.У. Термические свойства кремния с кластерами атомов никеля // Физика.–Томск, 2008.– № 3 (11).– С.170-172.
6. Бахадирханов М.К., Илиев Х.М., Мавлянов Г.Х., Сатаров О.Э., Эгамбердиев Б.Э., Сапарниязова З.П., Тачилин С.А. Подвижность носителей заряда в кремнии с многозарядными нанокластерами атомов марганца // VI – международная конференция и V – школа молодых ученых и специалистов. Кремний–2009, Новосибирск, 7-10 июля, 2009 г.
7. Бахадирханов М.К., Абдурахманов Б.А. Физико-технологические основы формирования кластеров примесных атомов в кремнии // Доклады АН РУз. – Ташкент, 2013. – № 3.– С. 29-33.
8. M.K. Bakhadyrkhanov, G.Kh. Mavlonov, S.B. Isamov, Kh.M. Iliyev, K.S. Ayupov, Z.M. Saparniyazova, and S.A. Tachilin. Transport Properties of Silicon Doped with Manganese via Low Temperature Diffusion // Inorganic Materials, 2011, Vol. 47, No. 5, pp. 479-483.
9. Bakhadyrkhanov M.K., Ayupov K.S., Mavlyanov G.Kh., Iliyev Kh.M., and Isamov S.B. Photoconductivity of Silicon with Nanoclusters of Manganese Atoms // Russian Microelectronics, 2010, Vol. 39, No. 6. pp. 401-404.
10. Саъдуллаев, А.Б. and Курбонов, Н.А., 2017. Влияние концентрации электроактивных атомов марганца на гальваномагнитные свойства кремния в условиях сильной компенсации. *Наука, техника и образование*, (3 (33)), pp.14-16.
11. Саъдуллаев, А.Б. and Умиров, А.П., 2018. Высокочувствительные датчики магнитного поля на основе сильно компенсированного кремния, работающие при наличии фоновой освещённости. *Universum: технические науки*, (4 (49)), pp.7-7.
12. Саъдуллаев, А.Б., 2014. Особенности комплексообразования между примесными атомами марганца и кислорода в кремнии. *Молодой ученый*, (12), pp.50-52.
13. Файзиев, М.М., Имомназаров, А.Б., Ибрагимов, И.И. and Раджабов, М.К., 2022. СТАБИЛИЗАТОР ТОКА. *Наука, техника и образование*, (1 (84)), pp.38-42.