Uzbek Journal of Physics
Vol.21(№3) 2019 PP.147-152

НОВЫЙ ФОТОМАГНИТНЫЙ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫЙ МАТЕРИАЛ

Г.Х. Мавлонов, Ш.Б. Шергозиев

Ташкентский государственный технический университет,10095, Ташкент, Узбекистан
giyosiddin-m@rambler.ru
(Получена 15.11.2018)

Таркибида магнит нанокластерлари мавжуд кремний оқ ёруғлик ва инфрақизил нурларни сезувчи янги фотомагнит материал эканлиги аниқланди. Фон ёруғлигининг I=1–100 Лк етарлича қисқа оралиғида, магнит қаршилик қийматини 300 К ҳароратда 100 мартадан ортиқ ўзгартириш мумкин. Олинган натижалар ишлаш принципи янгича бўлган фотомагнит асбобларни яратиш имконини беради ва фото- ва ИҚ-спинтроника каби янги илмий йўналишлар ривожланиши учун асос бўлиб хизмат қилади.

Установлено, что кремний с магнитными нанокластерами является принципиально новым фотомагнитным материалом, обладающим высокой чувствительностью как к фоновому, так и к ИК-свету. В достаточно узком интервале интенсивности фонового освещения I=1–100 Лк при 300 К можно изменить значение магнетосопротивления больше, чем в 100 раз. Полученные результаты позволяют разработать принципиально новые фотомагнитные приборы и служат основой для развития нового научного направления – фото- и ИК-спинтроники.

It has been found that silicon with magnetic nanoclusters is basis for new photomagnetic material possessing high sensitivity both to background and to IR-light. In enough narrow interval of background illumination intensity I = 1–100 Lk, the magnetoresistance value can change by more than 100 times at 300 K. The obtained results allow one to design new photomagnetic devices and are a basis of development of new scientific directions as photo- and IR-spintronics.

Физические свойства магнитных полупроводниковых материалов достаточно хорошо изучены. Однако в них не обнаружено влияния освещенности на их магнитное сопротивление [1, 2]. Разработка технологии получения полупроводниковых материалов, в которых можно не только управлять значением магнитосопротивления (МС), но и менять характер МС, т.е. осуществлять инверсию от положительного к отрицательному МС или наоборот, представляет большой научный и практический интерес. Прежде всего, это необходимо для разработки и создания принципиально новых фотомагнитных материалов с достаточно высокими МС и фоточувствительностью. В полупроводниковых материалах, легированных парамагнитными примесями, хотя и наблюдается небольшое МС, но в основном в области низких температур, фоточувствительность также очень слабая или вообще отсутствует.

Авторами предложен принципиально новый инновационный подход, суть которого заключается в формировании наномагнитных кластеров в решетке кремния [3, 4]. С одной стороны, они обладают достаточно большим магнитным моментом, с другой стороны, эти наномагнитные кластеры действуют как квантовые точки, в которых можно управлять энергетическим состоянием электронов за счет эффекта квантования. Разработанная авторами низкотемпературная диффузионная технология легирования кремния [5] позволяет

не только формировать нанокластеры, состоящие из 4-х атомов марганца, находящихся в ближайших эквивалентных междоузлиях в решетке кремния [6-8] вокруг отрицательно заряженного атома бора, но и обеспечить максимальное участие введенных примесных атомов в формировании нанокластеров.

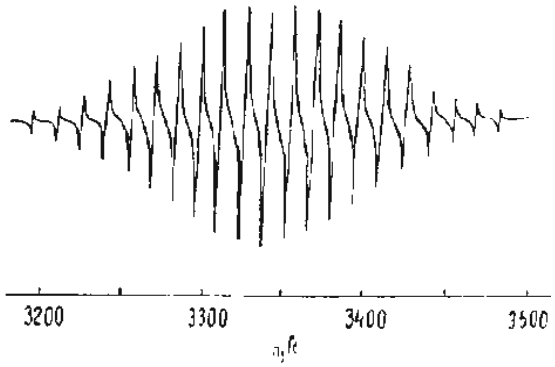


Рис. 1. Спектр ЭПР нанокластера, состоящего из 4-х атомов марганца в кремнии

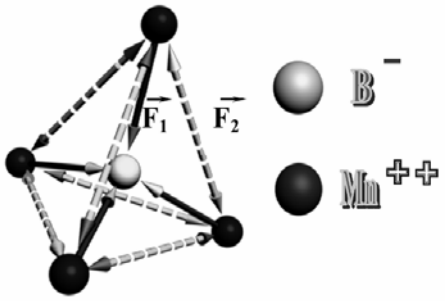


Рис. 2. Структура Mn_4B в решетке кремния.

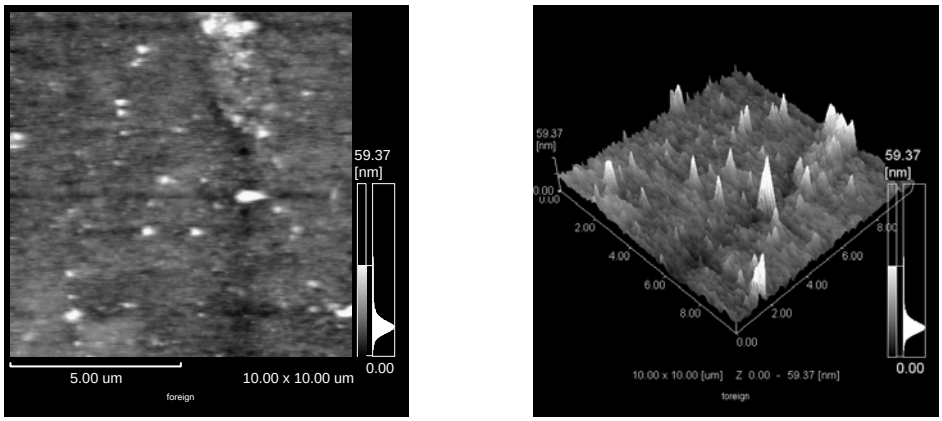
В качестве исходного материала был выбран кремний *p*-типа проводимости с концентрацией бора $N_B \geq 1/2N_{Mn}$. Данные условия не только обеспечили ионизацию всех введенных атомов марганца в виде Mn^{++} (атомы марганца в кремнии являются донорами и создают два энергетических уровня в запрещенной зоне), но и полученные образцы кремния остались *p*-типом с достаточно низкой концентрацией дырок $p=(4–5)\times10^{12}$ $см^{-3}$. В этих условиях нанокластеры, состоящие из 4-х атомов марганца в междоузлиях решетки кремния вокруг атома бора, действуют как многозарядные наномагнитные кластеры $[(Mn^{++})_4B^-]^{+7}$.

Формирование магнитных кластеров было доказано исследованием состояния атомов марганца методом ЭПР (рис. 1). Структура такого нанокластера представлена на рис. 2.

Исследование магнитной восприимчивости кремния с нанокластерами атомов марганца [9] показало, что магнитный момент кластеров составляет $M = 800\ \mu_B$. Многозарядность магнитных нанокластеров была подтверждена исследованием их состояния с помощью атомного силового микроскопа (АСМ) (рис. 3), а также исследованием подвижности дырок в этих материалах.

Как показали результаты исследования, в полученных образцах при комнатной температуре подвижность дырок имеет достаточно низкое значение, почти в 3.5–4 раза меньше, чем подвижность дырок в кремнии.

В таблице представлены сравнительные значения подвижности кремния с различным зарядовым состоянием нанокластеров атомов марганца. Полученные результаты можно объяснить только наличием достаточно большой концентрации мощных отталкивающих центров для дырок, т.е. многократно положительно заряженных нанокластеров.



a) вертикальная проекция *b*) профильная проекция

Рис. 3. Изображения многозарядных нанокластеров примесных атомов марганца в кремнии, полученные на атомном силовом микроскопе для образцов *p*-Si<B,Mn> с положением уровня Ферми $F=E_V+0.385$ эВ: *a* – вертикальная проекция, *b* – профильная проекция.

Таблица. Подвижность дырок в образцах кремния с нанокластерами

ρ, Ом·см	Тип и концентрация носителей заряда, p, n, см$^{-3}$	Подвижность носителей заряда μ, см^2/В·с	E_F, эВ	Возможное зарядовое состояние кластера	Зарядовое состояние атомов марганца
$1.5–2\times10^2$	$p=1.69\times10^{14}$	189–197	0.297	+7	Mn^{++}
$2.5–3\times10^2$	$p=1.26\times10^{14}$	164–167	0.303	+7	Mn^{++}
$8–9\times10^2$	$p=7.98\times10^{13}$	86–90	0.315	+7	Mn^{++}
$7–8\times10^3$	$p=1.22\times10^{13}$	63–64	0.363	+7	Mn^{++}
$1–1.2\times10^4$	$p=6.85\times10^{12}$	75–78	0.378	+6	$Mn^{++} > Mn^{+}$
$1.5–2\times10^4$	$p=3.86\times10^{12}$	81–83	0.393	+5	$Mn^{++} \sim Mn^{+}$
$3–4\times10^4$	$p=1.59\times10^{12}$	93–97	0.415	+4	$Mn^{++} \sim Mn^{+}$
$1–1.2\times10^5$	$p=3.28\times10^{11}$	158–164	0.457	+4	$Mn^{++} \leq Mn^{+}$
$1–1.2\times10^5$	$n=6.76\times10^{10}$	958–965	0.508	+3	$Mn^{++} < Mn^{+}$
$4–5\times10^4$	$n=1.44\times10^{11}$	1198–1210	0.491	+3	$Mn^{++} < Mn^{+}$
$2–3\times10^3$	$n=2.08\times10^{12}$	1098–1110	0.416	+3	Mn^{+}

В результате проведенных исследований в образцах кремния с магнитными нанокластерами впервые обнаружено аномально высокое отрицательное магнитосопротивление (ОМС) при комнатной температуре, значение которого в зависимости от концентрации нанокластеров составляет 100–300% (рис. 4).

Ни в одном магнитном полупроводнике не было обнаружено столь высокое значение ОМС не только при комнатной температуре, но даже при низких температурах [10]. Полученные результаты еще раз подтверждают, что атомы марганца создают наномагнитные кластеры и позволяют получать магнитный материал на основе кремния.

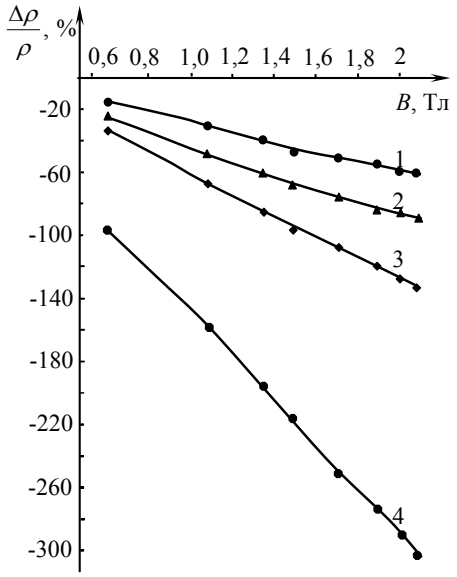


Рис. 4. Зависимость ОМС от магнитного поля в образцах с различной концентрацией магнитных нанокластеров при T= 300 К, E=100 В/см, N_{Mn^4} : 2×10^{13} см$^{-3}$ (*1*), 2×10^{14} см$^{-3}$ (*2*), 5×10^{14} см$^{-3}$ (*3*), 10^{15} см$^{-3}$ (*4*).

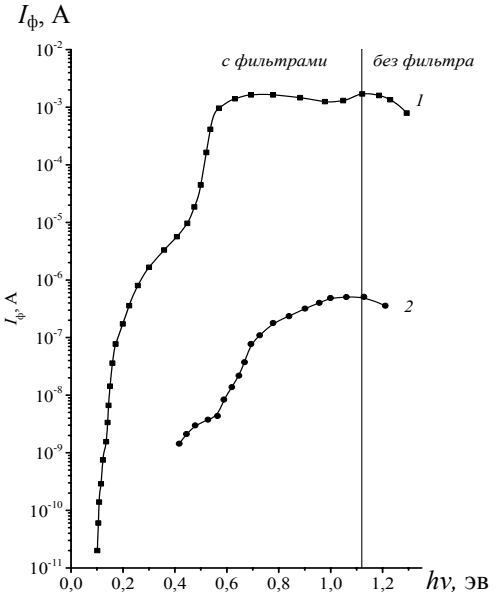


Рис. 5. Спектральная зависимость фотопроводимости кремния с многозарядными центрами.

Спектральная зависимость фотопроводимости того же образца, в котором было обнаружено аномально большое ОМС, представлена на рис. 5. Наблюдается примесная фотопроводимость, не связанная с энергетическими уровнями атомов марганца в кремнии $E_1=E_C-0.3$ эВ, $E_2=E_C-0.5$ эВ [11]. Особенность полученных результатов заключается, во-первых, в существенном расширении фотопроводимости до λ=10 мкм ($h\nu$=0.12 эВ), во-вторых, в непрерывном росте ФП в области λ=1.5–10 мкм, в третьих, это аномально высокая примесная фотопроводимость во всей исследуемой области спектра и, особенно, в области λ=1.55–1.6 мкм. Эти результаты также подтверждают, что в многозарядных магнитных нанокластерах происходит существенная перестройка энергетических состояний электронов.

Интересные результаты были получены при исследовании влияния фонового света на поведение ОМС в исследуемых образцах (рис. 6). Впервые было обнаружено, что при освещении значение ОМС не только существенно уменьшается, т.е. происходит эффект фотогашения магнитосопротивления, но и при интенсивности $I\geq$100 Лк происходит инверсия знака МС, т.е. ОМС переходит в ПМС (положительное магнитосопротивление). Установлено, что в достаточно узком интервале интенсивности фонового освещения I =1–100 Лк можно изменить значение МС более, чем в 100 раз, а также впервые была показана возможность изменения характера МС. Следует отметить, что все указанные явления происходят при комнатной температуре.

Также было исследовано влияние интегрального света (ИС) на МС в исследуемых образцах. Установлено, что ОМС имеет достаточно высокую спектральную чувствительность при комнатной температуре. Заметное влияние на

значение ОМС начинается при освещении с λ=3 мкм ($h\nu$=0.4 эВ). С уменьшением длины волны эффект существенно увеличивается. В интервале $h\nu$=0.4–1.1 эВ (λ=1–3 мкм) значение ОМС уменьшается в 35–40 раз при мощности ИК-света $W\sim 10^{-6}$ Вт при T=300 K (рис. 7). Результаты эксперимента показали, что с ростом мощности ИК-излучения, эффект инфракрасного гашения ОМС усиливается.

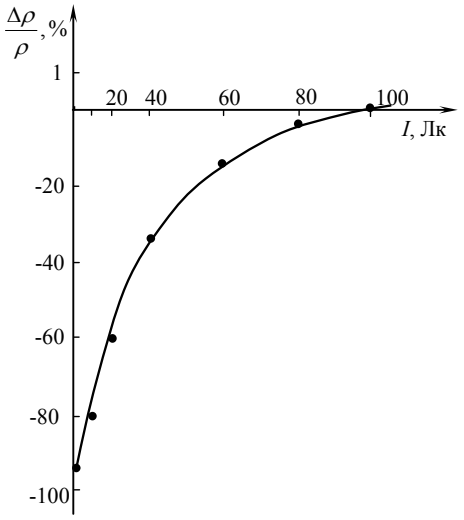


Рис. 6. Зависимость магнитосопротивления от интенсивности освещения в образцах p-типа Si<B,Mn> с удельным сопротивлением 5×10^3 Ом·см при E=100 В/см и T=300 К.

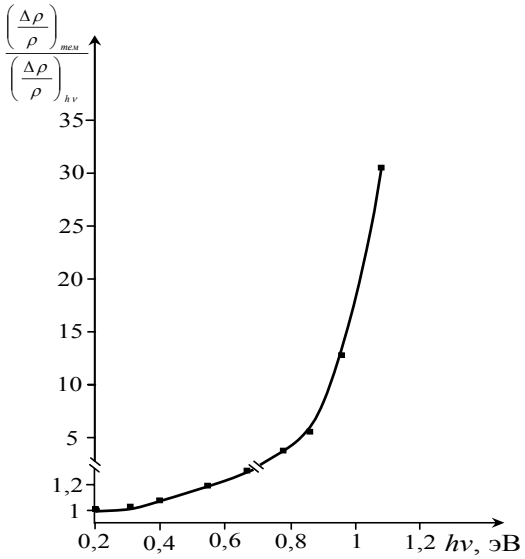


Рис. 7. Спектральная зависимость кратности уменьшения ОМС под действием ИК света $(\Delta\rho/\rho)_{h\nu}$ относительно темнового значения ОМС $(\Delta\rho/\rho)_{\text{тем}}$ в образцах Si<B,Mn> p-типа с $\rho=5\times10^3$ Ом·см.

Полученные результаты позволяют утверждать, что кремний с наномагнитными кластерами не только является новым магнитным материалом с аномально большим значением ОМС при T=300 K. Но и является принципиально новым фотомагнитным материалом, обладающим высокой чувствительностью ОМС как к фоновому, так и к ИК свету, которые не были обнаружены ни в одном магнитном полупроводниковом материале. Полученные результаты не только позволяют разработать принципиально новые фотомагнитные приборы, но и могут служить основой для развития такого нового научного направления как фото- и ИК- спинтроника.

ЛИТЕРАТУРА

1. Е.С. Демидов, В.В. Подольский, В.П. Лесников и другие. Тезисы докладов VI Международной конференции и V Школы молодых ученых и специалистов «Кремний -2009» (Новосибирск, 7-10 июля 2009, с. 125-126).
2. H. Akinago, J. Deboeer, G. Borghs и др., Ahhl Phys. Lett. **72**, № 25, 3368 (1998).
3. М.Г. Мильвидский, В.В. Чалдышев, ФТП **32,** №5, 513 (1998).
4. М.К. Бахадырханов, Г.Х. Мавлонов, К.С. Аюпов, С.Б .Исамов, ФТП **44**, №9, 1181 (2010)

5. М.К. Бахадырханов, К.С. Аюпов, Х.М. Илиев, Г.Х. Мавлонов, О.Э. Саттаров, Письма в ЖТФ **36**, № 2, 11 (2010).
6. G.W. Ludwig, H.H. Woodbury, J. Phys. Chem. Sol. **8**, 490 (1959).
7. В.И. Фистуль, В.М. Казакова, Ю.А. Бобриков, А.В. Рябцев, К.П. Абдурахманов, С. Зайнабидинов, Т.С. Камилов, Ш.Б. Утамурадова,ФТП **16**, № 5, 939 (1982).
8. J. Kreissl, W. Gehlhoff, Phys.Stat.Sol.(**b),** № 145, 609 (1988).
9. Z.A. Yunusov, Sh.U. Yuldashev, Kh.T .Igamberdiev, Y.H. Kwon, T.W. Kang, M.K. Bakhadyrkhanov, S.B. Isamov and N.F. Zikrillaev, Journal of the Korean Physical Society **64**, №10, 1461 (2014).
10. А.И. Венгер, А.Г. Забродский, Т.В. Тиснек, ФТП **34**, №7, 774 (2000).
11. К.П. Абдурахманов, А.А. Лебедев, Й. Крейсль, Ш.Б. Утамурадова, ФТП **19**, №2, 213 (1985).