

Ферромагнетизм кремния, имплантированного Mn: намагниченность и магнито-оптический эффект Фарадея

А. Б. Грановский, Ю. П. Сухоруков⁺, А. Ф. Орлов*, Н. С. Перов, А. В. Королев⁺, Е. А. Ганьшина,
В. И. Зиненко*[∇], Ю. А. Агафонов[∇], В. В. Сарайкин*[□], А. В. Телегин⁺, Д. Г. Яркин*

Московский Государственный университет им. М.В. Ломоносова, 119992 Москва, Россия

⁺ Институт физики металлов Уральского отд. РАН, 620212 Екатеринбург, Россия

* Государственный научно-исследовательский и проектный институт редкометаллической промышленности "Гиредмет"
119017 Москва, Россия

[∇] Институт проблем технологии микроэлектроники и особо чистых материалов РАН
142432 Черноголовка, Московская обл., Россия

[□] Государственный научно-исследовательский институт физических проблем им. Ф.В. Лукина
103460 Зеленоград, Москва, Россия

Поступила в редакцию 28 февраля 2007 г.

Кремниевые пластины n- и p-типа были имплантированы ионами марганца в диапазоне доз от $1 \cdot 10^{15}$ до $2 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-2}$ при энергии ионов 195 кэВ. На всех образцах, согласно данным магнитных измерений на вибрационном магнитометре и СКВИД-магнитометре, наблюдалось ферромагнитное упорядочение при комнатной температуре. Магнито-оптический эффект Фарадея проявлялся в спектральной области 1–6 мкм в интервале температур 80–305 К. Анализ полевых и температурных зависимостей намагниченности и спектра эффекта Фарадея свидетельствует о перколяционном типе магнитного упорядочения при низких температурах и определяющей роли обмена между делокализованными носителями p-типа и ионами Mn при температурах выше 100 К.

PACS: 42.25.Ja, 75.50.Pp, 78.20.Ls

1. Возможность существования ферромагнитного упорядочения в легированных магнитными примесями элементарных полупроводниках при температурах выше комнатной и механизмы этого упорядочения вызывают значительный научный и практический интерес. Ферромагнетизм при комнатной температуре наблюдался недавно в работах [1–3] при имплантации марганцем кремниевых пластин и нанопроволок [4], а также при осаждении пленок Si:Mn [5, 6].

Кремний не образует ферромагнитных соединений с Mn при температуре выше 29 К, кластеры Mn, возможно образующиеся в процессе имплантации, заведомо не являются ферромагнитными, а метод имплантации практически исключает внедрение во внутренний объем первоначально немагнитных образцов посторонних ферромагнитных включений. Поэтому следует ожидать, что ферромагнетизм в имплантированных образцах Si:Mn при комнатной температуре является собственным, а не связанным с наличием ферромагнитных кластеров или посторонней ферромагнитной фазы.

Основным требованием к разбавленным магнитным полупроводникам (РМП), как к новым материа-

лам спинтроники, является сочетание полупроводниковых свойств со значительной намагниченностью и спиновой поляризацией носителей тока, что является трудной задачей, так как увеличение концентрации магнитных примесей, как правило, приводит к возрастанию проводимости РМП вплоть до металлической [7]. В то же время для магнито-оптических (МО) применений, таких как оптические изоляторы, циркуляторы, модуляторы света в оптоэлектронике, создающиеся на кремнии оптические компьютеры, магнитофотонные кристаллы, не требуются ни значительная намагниченность, ни спиновая поляризация носителей тока, и даже наличие кластеров наномасштабного размера не является существенным ограничением. В частности, РМП GdMnTe и ZnCoO (см., например, [8, 9]) обладают при низких температурах рекордным МО откликом. Отметим также, что МО спектроскопия и МО магнитометрия являются весьма эффективными методами изучения ферромагнитного упорядочения.

В данной работе методом имплантации получены ферромагнитные при комнатной температуре образцы Si:Mn, на которых обнаружен МО эффект Фарадея. Полученные экспериментальные данные отно-

сительно знака и спектральной зависимости эффекта Фарадея в сочетании с результатами магнитных измерений позволяют предложить комбинированный механизм формирования магнитного упорядочения в РМП.

2. Для имплантации ионов марганца нами использовались пластины монокристаллического кремния *n*- и *p*-типа с концентрацией носителей заряда от $9 \cdot 10^{14}$ до $2 \cdot 10^{19} \text{ см}^{-3}$. Имплантация ионов $^{55}\text{Mn}^+$ в диапазоне доз от $1 \cdot 10^{15}$ до $2 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-2}$ проводилась на установке Extrion 200-1000 (Varian) при энергии ионов 195 кэВ и температуре 350 °С. После имплантации часть образцов подвергалась кратковременному отжигу в вакууме при температуре 850 °С в течение 5 мин для устранения эффектов аморфизации материала.

Магнитные измерения выполнены при комнатной температуре на вибрационном магнитометре, обладающем чувствительностью 10^{-6} e.m.u. , и при 4.2–400 К с помощью СКВИД-магнитометра MPMS-5-XL.

Оптические и МО исследования трех образцов, характеристики которых представлены в таблице, проводились на высокочувствительном ИК спектрометре в диапазоне длин волн 1–16 мкм, температурном интервале 80–360 К, магнитных полях до 8 кЭ. Температурные зависимости измерялись в режиме нагрева со скоростью 1–3 град/мин. Геометрия измерения – фарадеевская (свет распространяется вдоль силовых линий магнитного поля). Коэффициент поглощения определялся по известному выражению для прозрачных сред $K = (1/d) \ln((1-R)^2(I_0/I))$, где d – суммарная толщина образца, равная для пластин кремния 0.044 см, R – коэффициент отражения, I_0 и I – интенсивности света при наличии и в отсутствие образца.

Эффект Фарадея измерялся по стандартной методике (см., например, [10]). Величина удельного фарадеевского вращения (Φ) рассчитывалась по известному выражению $\Phi = (1/2d^*) \arcsin(\Delta I/I_0)$, где d^* – эффективная толщина магнитного слоя, $\Delta I = I_+ - I_-$, I_+ и I_- – амплитуды сигнала в магнитном поле, направленном вдоль и против распространения света, $I_0 = (I_{\parallel} - I_{\perp})/2$, где I_{\parallel} и I_{\perp} – амплитуды сигнала при параллельных и скрещенных плоскостях поляризации поляризатора и анализатора, соответственно [10]. Величины d^* определялись по кривым распределения ионов Mn в матрице Si (рис.1), полученным методом SIMS, и составили $d^* = 0.2 \text{ мкм}$ для образца 3 и $d^* = 0.32 \text{ мкм}$ для образцов 1 и 2. Различие эффективных толщин магнитных слоев обусловлено отжигом образца 3 после имплантации по указанному выше режиму.

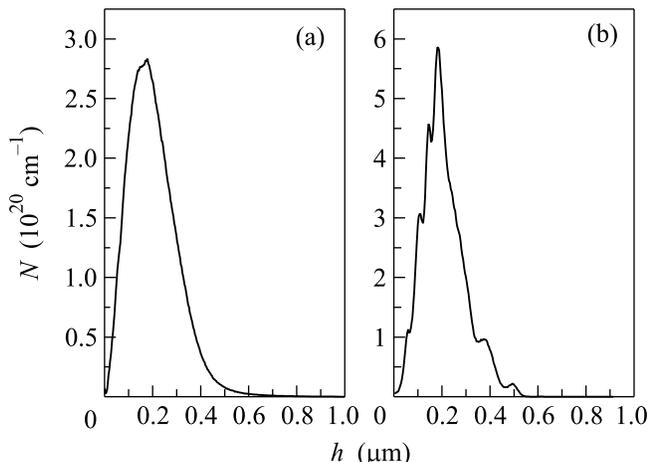


Рис.1. Распределение концентрации ионов марганца вблизи поверхности монокристалла кремния после имплантации (а) и последующего отжига (б)

3. Согласно магнитным измерениям, как на вибрационном магнитометре, так и на СКВИД-магнитометре для всех имплантированных образцов наблюдалось ферромагнитное упорядочение вплоть до температур выше комнатной. В частности, для образца 3 не замечено существенного уменьшения намагниченности вплоть до 400 К, что соответствует литературным данным [1]. Вид петель гистерезиса, определенных при комнатной температуре при отношении сигнал/шум на уровне 1–5, соответствовал данным по имплантированному марганцем кремнию [3], коэрцитивная сила была 30–50 Э, что примерно в 2 раза меньше, чем в [3]. На рис.2 показаны

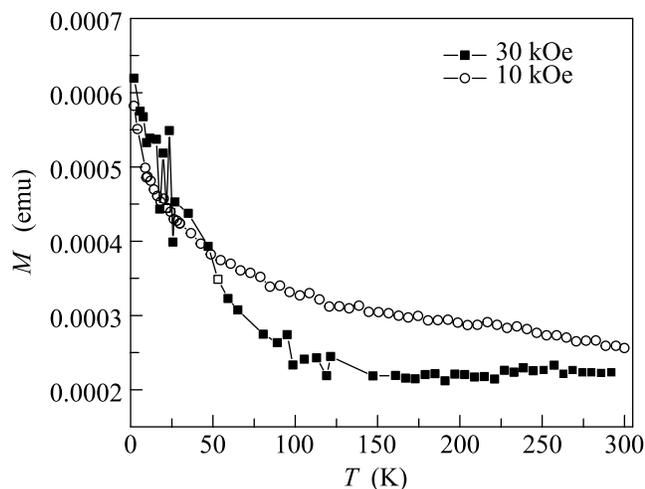


Рис.2. Зависимость намагниченности (образец 3) от температуры

зависимости намагниченности имплантированного слоя от температуры в полях 10 и 30 кЭ. Эти дан-

№ образца	1	2	3
Тип проводимости	<i>p</i>	<i>n</i>	<i>p</i>
Концентрация носителей заряда, см ⁻³	$2 \cdot 10^{19}$	$9 \cdot 10^{14}$	$1.2 \cdot 10^{15}$
Доза имплантации марганца, см ⁻²	$1 \cdot 10^{15}$	$2 \cdot 10^{16}$	$2 \cdot 10^{16}$

ные получены путем вычитания из измеренных на СКВИД-магнитометре суммарных значений намагниченности диамагнитного вклада неимплантированного кремния. “Неблеховское” низкотемпературное поведение намагниченности указывает на то, что ферромагнитное упорядочение при $T < 50$ К, когда носители заряда локализованы или мала их концентрация, происходит по перколяционному типу [11], то есть образующиеся магнитные поляроны формируют бесконечный магнитный перколяционный кластер в образце. Такое же “неблеховское” поведение было найдено в работе [3] в поле 500 Э и соответствует расчетам в рамках перколяционной модели [11]. Неожиданным оказалось то, что при $T > 50$ К намагниченность, измеренная в поле 30 кЭ, меньше, а не больше, чем в поле 10 кЭ (рис.2). Этот факт можно объяснить тем, что сильное внешнее магнитное поле уменьшает обмен между носителями заряда и магнитными моментами Mn. По-видимому, в силу зеемановского взаимодействия носителей заряда с полем уменьшается радиус их волновых функций, что и приводит к уменьшению обменного взаимодействия. В некотором смысле этот эффект аналогичен индуцированному магнитным полем переходу металл-диэлектрик. При $T < 50$ К, когда ферромагнитное упорядочение внутри магнитного полярона или магнитного кластера устанавливается на нескольких координационных сферах, это влияние несущественно, и намагниченности при 30 и 10 кЭ практически совпадают (рис.2). Этот новый эффект подавления сильным магнитным полем обменного взаимодействия в РМП будет детально исследован отдельно.

На рис.3 представлены спектры удельного ФВ образцов Si:Mn в поле 8 кЭ при 80 К, а на вставке – типичный вид спектра оптического поглощения при комнатной температуре. ФВ возрастает при ~ 1 мкм, то есть вблизи края поглощения, и эффект уверенно наблюдается вплоть до 6 мкм. С учетом возможного отличия в распределении ионов Mn по толщине в разных образцах амплитуда и вид спектров ФВ в области 1.6–6 мкм весьма близки, несмотря на то, что исходные кремниевые пластины были *n*- и *p*-типа. Спектр ФВ низкоомного образца 1 удалось измерить до 1.6 мкм, что обусловлено существенным увеличением вклада поглощения света свободными носителя-

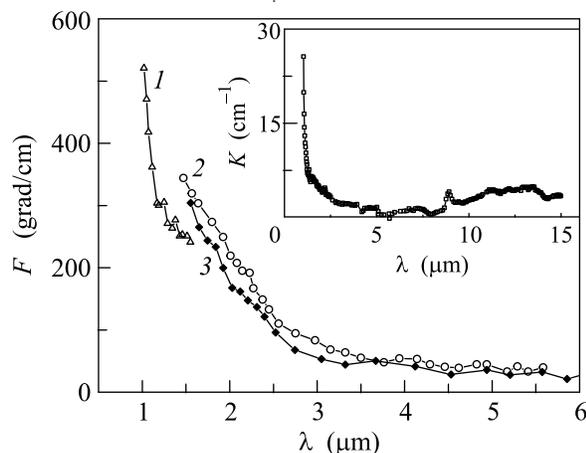


Рис.3. Спектры удельного фарадеевского вращения имплантированного марганцем кремния Si:Mn при 80 К в поле 8 кЭ. На вставке показан спектр оптического поглощения Si:Mn при комнатной температуре. Цифрами указаны номера образцов

ми заряда в этом материале. Температурная зависимость ФВ в диапазоне 100–300 К оказалась слабой, соответствовала температурным изменениям намагниченности в поле 10 кЭ, представленным на рис.2, и поэтому не приводится. В частности, удельное ФВ при комнатной температуре на длине волны 1.65 мкм составило $F \sim 300$ град/см. После удаления имплантированного слоя механическим шлифованием эффект Фарадея исчез, что подтверждает собственный ферромагнетизм имплантированного кремния.

Обнаруженный эффект Фарадея может быть связан с двумя механизмами – либо с “хвостом” внутриатомного магнитоактивного перехода в ионах Mn, либо с влиянием спин-орбитального взаимодействия на внутризонные оптические переходы. Первый вариант представляется маловероятным, так как внутриатомные переходы Mn в РМП наблюдаются в окрестности 2 эВ [8, 9], то есть при $\lambda \sim 0.6$ мкм, хотя и нельзя полностью исключить, что в Si эти переходы могут быть сдвинуты в область ближе к 1 мкм. Второй сценарий для случая GaAs:Mn рассмотрен в работе [7], и в этом механизме ФВ является частотным аналогом аномального эффекта Холла. При таком сценарии введение примесей Mn приводит как к дополнительному поглощению света, так и к МО эффектам в запрещенной зоне [7, 9]. Так как, согласно

[8], $F \sim E(\partial n/\partial E)\Delta E$, где n – коэффициент преломления, $E = \hbar\omega$ – энергия кванта света, а ΔE – энергия соответствующего перехода, то для внутризонных переходов $\Delta E = \hbar\omega = \hbar 2\pi c/\lambda$, а следовательно, ФВ должно наблюдаться вблизи края поглощения, где велико $\partial n/\partial E$, и должно убывать как $1/\lambda^2$, что на качественном уровне соответствует эксперименту.

В полупроводниках знак ФВ, как правило, положителен для проводимости p -типа и отрицателен для n -типа [10]. Это указывает на дырочный тип носителей заряда в Si:Mn, что соответствует развитым представлениям об индуцированном дырками ферромагнетизме РМП [7]. Следует отметить, что в силу компенсации носителей как в n -Si, так и в p -Si при внедрении Mn, имплантированный слой становится высокоомным, и поэтому определение типа проводимости в этом слое при наличии низлежащих неимплантированных низкоомных слоев кремния путем измерения эффекта Холла является весьма трудной задачей. Измерения МО эффекта Фарадея дают ответ на этот важный для теории ферромагнитного упорядочения в РМП вопрос.

Таким образом, в имплантированных ионами марганца монокристаллах кремния наблюдалось фарадеевское вращение плоскости поляризации света при комнатной температуре. ФВ наблюдается в спектральном интервале 1–6 мкм. Импульсный отжиг образцов в вакууме после имплантации не привел к существенному изменению характера спектров ФВ. Полученные данные указывают на собственный ферромагнетизм в исследованных образцах и на индуцированный дырками ферромагнетизм Si:Mn при 100–300 К, при более низких температурах данные СКВИД-магнитометрии свидетельствуют о перколяционном типе ферромагнитного упорядочения. Такой комбинированный тип магнитного упорядоче-

ния был недавно предложен для оксидных магнитных полупроводников [11, 12], но, по-видимому, имеет место и в Si:Mn. Обнаруженный МО эффект Фарадея в Si:Mn при комнатной температуре позволяет надеяться на использование легированного кремния в магнитофотонике при дальнейшем развитии и оптимизации технологии получения Si:Mn.

Работа выполнена при поддержке грантов Российского фонда фундаментальных исследований # 06-02-16604, # 06-02-16148 и # 07-02-00327.

1. M. Bolduc, C. Awo-Affouda, A. Stollenwerk et al., Phys. Rev. B **71**, 033302 (2005).
2. P. R. Bandaru, J. Park, J. S. Lee et al., Appl. Phys. Lett. **89**, 112502 (2006).
3. I. T. Yoon, C. J. Park, and T. W. Kang, J. Magn. Mater. (2007), in press.
4. H. W. Wu, C. J. Tsai, and L. J. Chen, Appl. Phys. Lett. **90**, 143121 (2007).
5. F. M. Zhang, X. C. Liu, J. Gao et al., Appl. Phys. Lett. **85**, 786 (2004).
6. Е. С. Демидов, Ю. А. Данилов, В. В. Подольский и др., Письма в ЖЭТФ **83**, 664 (2006).
7. J. Sinova, T. Jungwirth, and J. Cerne, Intern. J. Modern Phys. **18**, 1083 (2004).
8. J. K. Furduna, J. Appl. Phys. **64**, R29 (1988).
9. K. Ando, H. Saito, Z. Jin et al., Appl. Phys. Lett. **78**, 2700 (2001).
10. Магнито-оптические эффекты Фарадея и Фогта в применении к полупроводникам, Ф. Ф. Сизов, Ю. И. Уханов. Наукова Думка: Киев, 1979.
11. S. D. Sarma, E. H. Hwang, and A. Kaminski, Phys. Rev. B **67**, 155201 (2003).
12. M. J. Calderon and S. D. Sarma, cond-mat/0603182v1 (2006).