

ДЕТЕКТИРОВАНИЕ НАМАГНИЧЕННОСТИ ФЕРРОМАГНИТНОЙ ПЛЕНКИ В СТРУКТУРЕ Ni/GaAs ПО ПОЛЯРИЗАЦИИ ЭЛЕКТРОНОВ ПОЛУПРОВОДНИКА

Р.И.Джиоев, Б.П.Захарченя, П.А.Иванов, В.Л.Коренев

*Физико-технический институт им.А.Ф.Иоффе
194021 Санкт-Петербург, Россия*

Поступила в редакцию 7 октября 1994 г.

Обнаружено влияние ферромагнитной пленки никеля, нанесенной на поверхность n -GaAs ионным распылением, на поляризацию оптически ориентированных электронов в полупроводнике. Показано, что наличие пленки приводит к возникновению в полупроводнике флуктуирующих в пространстве магнитных полей, обусловленных ее доменной структурой, а также к появлению регулярного магнитного поля, пропорционального магнитному моменту пленки. Обнаружено фотоиндуцированное изменение коэрцитивной силы никелевой пленки. Использование полупроводника в качестве детектора намагниченности открывает новую возможность контроля состояния ферромагнитных пленок.

В последнее время значительный интерес вызывают системы ферромагнетик/парамагнитный металл [1, 2]. Наряду с этим были исследованы структуры ферромагнетик/полупроводник [3]. В работе [3] обнаружено влияние полупроводника на магнитные свойства ферромагнитной пленки Fe в системе Fe/GaAs. В то же время, можно ожидать, что ферромагнитная пленка, в свою очередь, будет оказывать влияние на магнитные процессы, происходящие в полупроводнике. Магнитные взаимодействия в полупроводниках широко исследуются с помощью метода оптической ориентации [4].

В настоящей работе показано, что ферромагнитная пленка никеля на поверхности арсенида галлия вызывает дополнительную спиновую релаксацию оптически ориентированных электронов полупроводника. Эта релаксация есть результат прецессии спинов электронов во флуктуирующих в пространстве магнитных полях, обусловленных доменной структурой ферромагнетика. Влияние пленки никеля проявляется в зависимости среднего спина поляризованных электронов, а также кривых магнитной деполяризации фотолюминесценции от намагниченности ферромагнетика. При этом выявляется возможность использовать полупроводник в качестве детектора намагниченности ферромагнитных пленок.

В свою очередь, освещение структуры Ni/GaAs светом приводит к радикальному изменению магнитных характеристик ферромагнитной пленки. Показано, что облучение образца лазерным светом интенсивностью $\approx 5 \text{ Вт/см}^2$ вызывает более чем трехкратное уменьшение коэрцитивной силы пленки никеля.

Ориентированные по спину вдоль возбуждающего луча электроны создаются в полупроводнике при межзонном поглощении циркулярно поляризованного света. Если за время жизни фотовозбужденные носители не утрачивают полностью спиновую ориентацию, то фотолюминесценция будет частично поляризована по кругу. Степень ρ круговой поляризации фотолюминесценции в GaAs численно равна проекции среднего спина электронов на направление возбуждающего луча [4].

Представляет интерес использование метода оптической ориентации для изучения структур ферромагнетик/полупроводник. Нами исследовался образец Ni/GaAs. GaAs n -типа ($\text{Si}:2 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3}$) выращен в направлении [001] методом жидкофазной эпитаксии толщиной 35 мкм на подложке из арсенида галлия толщиной 400 мкм. На поверхности слоя GaAs методом ионного распыления выращена пленка никеля толщиной $\approx 2000 \text{ \AA}$.

Эксперимент выполнен при температуре жидкого гелия. Генерация носителей осуществлялась светом, проходящим через никелевую пленку нормально к поверхности образца. В качестве источника возбуждения использовалась линия ($\lambda = 7525 \text{ \AA}$) непрерывного K^+ -лазера. Поляризация краевой люминесценции измерялась в максимуме линии, соответствующей рекомбинации экситона, локализованного на донорной примеси. Описание методики измерения поляризации фотолюминесценции приведено ранее [5]. С целью устранения поляризации спинов ядер полупроводника, влияющей на спин электронов [4], возбуждение осуществлялось светом знакопеременной на высокой частоте (26 кГц) циркулярной поляризации. Для этого был использован фотоупругий модулятор поляризации света [6]. Измерялись зависимости ρ от внешнего магнитного поля H , направленного как вдоль луча возбуждающего света (продольное поле H_L), так и поперек него (поперечное поле H_T параллельно плоскости пленки).

На рис.1 приведены результаты измерения деполаризации фотолюминесценции в поперечном магнитном поле (эффект Ханле). Экспериментальные точки, по которым проведена кривая 1, получены после предварительного размагничивания образца Ni/GaAs поперечным магнитным полем. В этом случае $\rho(H_T)$ симметрична относительно смены знака внешнего магнитного поля. Кривая 2 получена после предварительного намагничивания никеля в плоскости пленки в поле $H = 350 \text{ Э}$ (Поле H_T параллельно намагничивающему полю H). Она не симметрична относительно оси ординат и сдвинута на величину $0,3 \text{ Э}$ в направлении намагничивающего поля. Асимметрия была определена в результате прецизионных измерений значений $\rho(+H_T)$ и $\rho(-H_T)$ при одном знаке намагничивающего поля H (магнитное поле Земли компенсировалось с помощью катушек Гельмгольца с точностью $0,02 \text{ Э}$). В масштабе полей H_T на рис.1 эта симметрия проявляется слабо и поэтому значения $\rho(-H_T)$ не приводятся. Направление сдвига кривой меняется с изменением направления намагничивающего поля. Значение степени циркулярной поляризации люминесценции в нулевом магнитном поле $\rho(0) \approx 1,9\%$ в случае намагниченной пленки, а после размагничивания $\rho(0) \approx 1,5\%$. Полуширина кривой 2 меньше, чем полуширина кривой 1. Обратим внимание на то, что кривые магнитной деполаризации на рис.1 не зависят от направления прохода магнитного поля H_T , если диапазон изменения величины этого поля не превышает 30 Э .

Полученные результаты указывают на то, что при размагничивании никеля включается дополнительный канал спиновой релаксации электронов полупроводника, который приводит к уменьшению степени ρ и уширению кривых магнитной деполаризации. Действительно, фотовозбужденные электроны утрачивают за время их жизни начальную спиновую ориентацию в результате процессов спиновой релаксации. Включение дополнительного канала спиновой релаксации приведет к уменьшению их среднего спина и степени ρ . В поперечном магнитном поле деполаризация излучения происходит, когда период прецессии спинов в этом поле становится меньше времени исчезновения спина

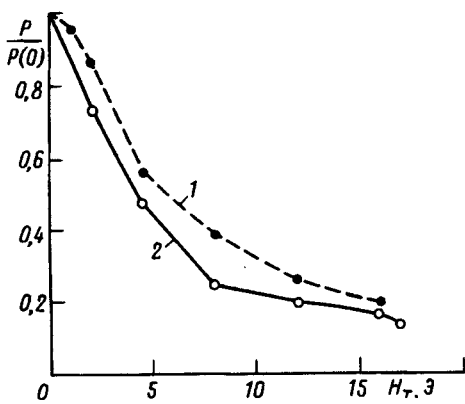


Рис.1

Рис.1. Деполяризация люминесценции в образце Ni/GaAs в поперечном магнитном поле: 1 – после размагничивания образца, 2 – после намагничивания в поле $H = 350$ Э. Ошибка измерения не превышает размера точек

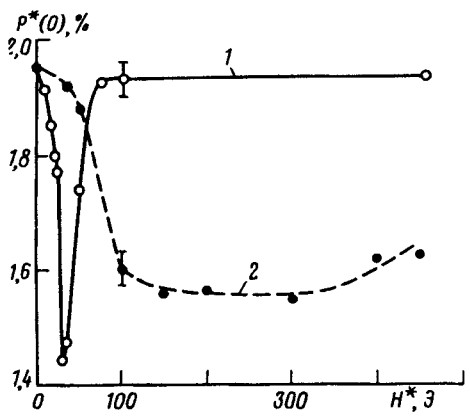


Рис.2

Рис.2. Зависимость степени $\rho^*(0)$ циркулярной поляризации люминесценции в нулевом магнитном поле от величины перемагничивающего поля H^* . Кривая 1: перемагничивание пленки осуществлялось при освещении образца; кривая 2: при перемагничивании пленки никеля возбуждающий свет перекрывался

T_S [4]. Чем короче T_S , тем в больших полях будет происходить деполяризация излучения, что приведет к уширению зависимости $\rho(H_T)$. Подключение дополнительного механизма релаксации спина вызывает укорочение времени T_S и, следовательно, уширение кривой деполяризации в поперечном магнитном поле. Таким образом, уменьшение ρ в нулевом магнитном поле и уширение кривой Ханле в случае размагниченного никеля свидетельствуют о включении дополнительного механизма спиновой релаксации.

Мы полагаем, что ответственной за дополнительную деполяризацию электронов в GaAs является прецессия электронного спина во флуктуирующих в пространстве магнитных полях, обусловленных доменной структурой размагниченного никеля. Полностью намагниченная пленка представляет собой один домен, что приводит к исчезновению флуктуирующих в пространстве случайных магнитных полей и подавлению спиновой релаксации. При этом в полупроводнике возникает регулярное магнитное поле H_0 , создаваемое намагниченной пленкой, которое складывается с внешним полем H_T . Это приводит к направленной прецессии электронного спина и смещению кривой магнитной деполяризации на величину поля H_0 . Оценивая величину регулярного поля H_0 по формуле $4\pi M d/L$, где M – намагниченность насыщения Ni, d – толщина пленки и $L = 4$ мм – размер образца, получим $H_0 = 0,3$ Э. Это согласуется с экспериментально наблюдаемым сдвигом $0,3$ Э, о котором говорилось выше.

Дополнительное подтверждение модели флуктуирующих полей дают проведенные нами измерения степени ρ в продольном магнитном поле. Обнаружено, что при увеличении поля H_L степень ρ в исследуемом образце Ni/GaAs растет и выходит на постоянный уровень 2,5% в поле $H_L \approx 100$ Э. В этом же образце GaAs без никелевой пленки $\rho = 3\%$ и не зависит от величины H_L в том же диапазоне полей. Увеличение степени циркулярной поляризации

в продольном магнитном поле изучалось в ряде полупроводников [4]. Было показано, что это увеличение обусловлено подавлением спиновой релаксации электронов в случайных магнитных полях. Количественное описание этого явления существенно зависит от соотношения между характерными размерами доменов ферромагнетика и длиной диффузии электронов в полупроводнике и выходит за рамки данного сообщения.

Приведенные выше результаты однозначно свидетельствуют о влиянии ферромагнитной пленки на оптическую ориентацию электронов в полупроводнике в структуре Ni/GaAs. По поляризации электронов в GaAs можно контролировать состояние ферромагнитной пленки, в частности, перестройку ее доменной структуры при намагничивании и размагничивании ее во внешнем магнитном поле.

Нами обнаружено также фотоиндуцированное изменение коэрцитивной силы ферромагнитной пленки в структуре Ni/GaAs. Освещение образца лазерным светом интенсивностью $\approx 5 \text{ Вт/см}^2$ приводит к более чем трехкратному ее уменьшению. Об этом свидетельствуют результаты эксперимента, в котором изучается влияние остаточной намагниченности пленки никеля на степень поляризации люминесценции в GaAs. Образец намагничивался во внешнем поле $H = -350 \text{ Э}$, направленном параллельно плоскости пленки. Затем намагничивающее поле уменьшалось до нуля и устанавливалось поперечное перемагничивающее поле H^* заданной величины, направленное противоположно намагничивающему полю. После этого перемагничивающее поле тоже выключалось и измерялась степень $\rho^*(0)$ круговой поляризации люминесценции, соответствующая остаточной намагниченности пленки после воздействия на нее внешнего поля H^* . Далее вышеописанная процедура повторялась для каждого значения поля H^* . Кривая 1 на рис.2 показывает зависимость $\rho^*(0)$ от H^* в случае, когда процесс намагничивания и перемагничивания пленки происходит при освещении образца лазерным лучом. Поток энергии света, падающего на поверхность образца, составляет $\approx 5 \text{ Вт/см}^2$. Площадь светового пятна не превышала 10^{-3} см^2 . В полях H^* , таких, что остаточная намагниченность никеля велика, спиновая релаксация электронов в GaAs, обусловленная доменной структурой никеля, подавлена и степень $\rho^*(0)$ максимальна. Когда $H^* \approx 30 \text{ Э}$, остаточная намагниченность минимальна, скорость спиновой релаксации велика и $\rho^*(0)$ минимальна. При значениях $H^* > 30 \text{ Э}$ пленка перемагничивается, что приводит к увеличению $\rho^*(0)$. Если перемагничивающее поле H^* имеет то же направление, что и намагничивающее поле, то $\rho^*(0) \approx 1,94 \pm 0,03$ и не зависит от величины поля H^* . Кривая 2 на рис.2 получена в условиях, когда перемагничивание пленки полем H^* осуществлялось после выключения возбуждающего света, который затем включался для измерения степени $\rho^*(0)$ в нулевом внешнем магнитном поле. При этом $\rho^*(0)$ существенно падает в полях $H^* \geq 100 \text{ Э}$. Следовательно, значения H^* , соответствующие минимальной величине $\rho^*(0)$ (пленка размагничена), в этих двух случаях (см. кривые 1 и 2) отличаются более чем в три раза. Это говорит о соответствующем уменьшении коэрцитивной силы при освещении образца. Отметим, что при смене знака намагничивающего поля и, соответственно, знака поля H^* обе кривые на рис.2 зеркально отражаются относительно оси ординат.

Такое огромное фотоиндуцированное уменьшение коэрцитивной силы в данном случае трудно объяснить локальным перегревом образца. Действительно, измерения гистерезиса намагничивания, которые проводились с помощью

СКВИДа на аналогичной структуре в темноте, показывают, что коэрцитивная сила уменьшается примерно в три раза при повышении температуры от 4,2 К до 75 К. В то же время нагрев образца, погруженного в жидкий гелий, при оптическом измерении кривой намагниченности не превышает нескольких градусов. Изменение магнитных свойств никеля может быть обусловлено влиянием полупроводника, контактирующего с ферромагнитной пленкой. Для выяснения природы этого эффекта необходимо дополнительное исследование.

Таким образом, в настоящей работе обнаружено существенное влияние напыленной на полупроводник ферромагнитной пленки на оптическую поляризацию электронов в полупроводнике. Наличие ферромагнетика приводит к возникновению дополнительной релаксации электронного спина в полупроводнике, зависящей от намагниченности пленки. Использование полупроводника в качестве детектора намагниченности открывает новую возможность контроля состояния ферромагнитных пленок. В то же время, полупроводник также может влиять на магнитные свойства ферромагнитной пленки, о чем свидетельствует фотоиндуцированное изменение коэрцитивной силы никеля в структуре Ni/GaAs.

Авторы глубоко признательны Л.С.Власенко за проведение измерений на СКВИДе, И.А.Меркулову, В.И.Перелю и Э.В.Сонину за обсуждения, М.Н.Степановой за предоставление кристаллов GaAs. Работа финансировалась Российским фондом фундаментальных исследований, проект 93-02-2603.

-
1. S.S.P.Parkin, R.Bhadra, and K.P.Roche, *Phys. Rev. Lett.* **66**, 2152 (1991).
 2. S.S.P.Parkin, *Phys.Rev. Lett.* **71**, 1641 (1993).
 3. J.J.Krebs, B.T.Jonker, and G.A.Prinz, *J. Appl. Phys.* **61**, 2596 (1987).
 4. Оптическая ориентация. Современные проблемы науки о конденсированных средах/ под ред. Б.П.Захарчени и Ф.Майера. Л.: Наука, 1989.
 5. Р.И.Джиюев, Б.П.Захарченя, К.В.Кавокин. П.Е.Пак, *ФТТ* **36**, 2752 (1993).
 6. S.N.Jasperson and S.E.Schnatterly, *Rev. Sci. Instrum.* **40**, 761 (1969).