

ВЛИЯНИЕ МАГНИТОДЕФОРМАЦИЙ НА СПИН-ЭЛЕКТРОННЫЙ ТРАНСПОРТ В ПЛЕНКАХ ФЕРРОМАГНИТНОГО СПЛАВА ГЕЙСЛЕРА

Кузавко Ю. А.

Полесский аграрно-экологический институт НАН Беларуси, Брест, Беларусь
kuzavko@newmail.ru

С выходом электронных технологий на уровень микромира становится весьма соблазнительным научиться использовать и специфическое качество электрона – спин, которое является чисто квантовым и не имеет аналогов в макром мире. Идея спинтронного аналога полевого транзистора, высказанная Даттой и Дасом и основанная на управлении спиновой поляризацией носителей заряда посредством их спин-орбитального взаимодействия с внешним электрическим полем, до сих пор экспериментально не реализована. То же справедливо относительно идеи поляризационного транзистора, сформулированной Кузавко и Шавровым и основанной на бистабильном характере изменения поляризации фотонов, прошедших магнитную пленку в области ее ориентационного фазового перехода. Выясняются условия протекания и усиления спинового тока в гетероструктуре полупроводник-окисел – сплав Гейслера с учетом действия температуры и/или внешнего магнитного поля. Управление генерацией и усилением спинового сигнала основано на деформировании зон проводящего канала под затвором вследствие действия магнитного поля и/или локального лазерного нагрева. При этом можно заставить спиновые компоненты тока управлять друг другом и добиться их усиления.

Введение

Идея спинтронного аналога полевого транзистора, высказанная в 1991 г. Даттой и Дасом [1] и основанная на управлении спиновой поляризацией носителей заряда посредством спин-орбитального взаимодействия с внешним электрическим полем, до сих пор экспериментально не реализована. Объединение легкости управления зарядом в полупроводниковых приборах с возможностью использования спиновой степени свободы электрона для хранения и передачи информации является весьма актуальной в связи с обработкой стремительно возрастающих в настоящее время потоков информации. Возможно, однако, что модель Датты–Дасы исчерпала свои возможности для ее экспериментальной реализации. Вследствие этого целесообразно рассмотреть альтернативные теоретические модели спинтронных устройств, особенно с использованием появившихся в конце 90-х годов новых материалов – высокотемпературных сверхпроводников и магнитоуправляемых материалов с памятью формы [2, 3]. Реализация записи, хранения и считывания информации на атомно-молекулярном уровне по-прежнему остается весьма актуальной ввиду многократного улучшения параметров таких устройств, работающих на чисто квантовых эффектах.

Отметим, что ранее Датты и Даса автором данного проекта и Шавровым была сформулирована идея поляризационного транзистора, суть которой заключается в теоретическом предсказании явления поляризационной магнитооптической бистабильности (ПМОБ) в магнитоупорядоченных пленках [4,5]. Такой эффект позволил бы по s-или p-поляризации светового луча (или даже единичного фотона) реализовать двоичную логику, а в дальнейшем в перспективе разработать оптический компьютер с колоссальной параллельной обработкой информации.

1. Поляризационный оптический транзистор. Теоретически предсказанное явление ПМОБ, представляет собой гистерезисную зависимость поляризации прошедшего ферромагнитную пленку светового сигнала в зависимости от его входной поляризации.

Пусть электромагнитная волна (ЭМВ) падает на ферромагнитную пленку (см. рис. 1) нормально. Тогда, исходя из уравнений Максвелла и Ландау-Лифшица, можно записать следующие нелинейные уравнения распространения ЭМВ:

$$h_{y,xx} - \epsilon k^2 \left[\mu_{yy}^2 h_y + \mu_{yx}^2 h_x + \mu_{21}^{NL} (h_y^3 + h_x^3) + \mu_{22}^{NL} h_y h_x (h_y + h_x) \right] = 0$$

$$h_{x,xx} - \epsilon k^2 \left[\mu_{xx}^2 h_x + \mu_{xy}^2 h_y + \mu_{31}^{NL} (h_y^3 + h_x^3) + \mu_{33}^{NL} h_y h_x (h_y + h_x) \right] = 0$$

где h – магнитное поле ЭМВ, \vec{k} – волновой вектор, ϵ – диэлектрическая проницаемость, μ^L и μ^{NL} – линейная и нелинейная магнитная проницаемость.

Численный анализ показывает, что, начиная с определенного значения входной интенсивности ЭМВ, возникает переориентация спинов в освещенной области и в результате возникает гистерезисная зависимость поляризации прошедшей ЭМВ от ее поляризации и интенсивности на входе (см. рис. 2). При этом оказывалось, что не существует принципиальных физических ограничений для достижения быстродействия 1 ТГц и энергопотребления 10^{-18} Дж, что обосновывалось тем, что сильный световой луч может переключать слабый световой сигнал с усилением последнего.

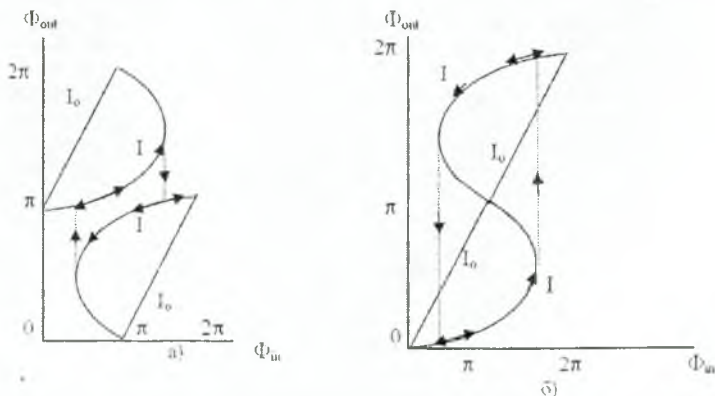


Рис. 2. ПМОБ при интенсивности $I > I_0$ (линейный эффект Фарадея) для четвертьволновой (а) и полуволновой (б) пленок

В недавнее время данная теория была развита, в том числе, применительно к реализации цифровых вычислений с использованием возможных устройств логики ИЛИ и НЕ. Следующим этапом после создания элементной базы на основе сформули-

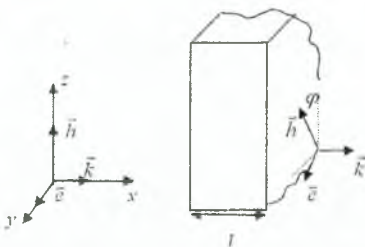


Рис. 1. Геометрия исследования

рованных принципов явилась бы разработка квантового компьютера и существенное продвижение в реализации распределенных вычислений.

С другой стороны, известны десятки вариантов чисто оптических транзисторов, предлагающихся на протяжении последних десятилетий, и не один из них не внедрен даже на уровне экспериментальных исследований. Возникшие в последнее время достижения в физике конденсированного состояния, материаловедении, нанотехнологиях позволяют возвратиться к переосмыслению и дальнейшему теоретическому исследованию ПМОБ, так как создание и разработка принципиально новой элементной базы компьютеров требует этого и без глубокой теоретической проработки невозможна.

2. Модели спиновых транзисторов. С выходом технологий на уровень микромира становится весьма соблазнительным научиться использовать и специфическое качество электрона – спин, которое является чисто квантовым и не имеет аналогов в макромире. Аналогичное утверждение справедливо также и относительно ориентации вектора поляризации светового импульса (в пределе – единичного фотона). Работы в этом направлении ведутся широким фронтом примерно с середины 90-х годов. Ожидается, что в перспективе спинтронные и фотонные технологии позволят создавать более быстрые и дешевые вычислительные устройства. Главное, что нужно научиться делать – это управлять спиновыми и фотонными токами. А для этого должны использоваться не электрические, а магнитные поля, поскольку электроны могут быть представлены как микроскопические магниты [8]. В самое последнее время (2000–2006 гг.) наблюдается резкий всплеск интереса к исследованию свойств единственного пока известного магнитоупорядоченного сплава Гейслера Ni–Mn–Ga, в котором надежно установлено наличие эффекта памяти формы (ЭПФ) как по температуре, так и по внешнему магнитному полю [3].

Определенный прогресс в прошлом году был достигнут группой физиков Университета штата Юта. Им впервые удалось создать спиновые переключатели, используя органические полупроводники. Такие устройства действуют как переключатель, с помощью которого можно управлять электрическим током, поскольку они способны изменять поток электричества до 40 %. Это связано с тем, что при приложении магнитного поля спины электронов могут менять свое направление на противоположное, что приводит к резкому повышению электрического сопротивления материала. Направление спина (“↑” или “↓”) отлично подходит для кодирования бинарной цифровой информации, что уже пытаются использовать в устройствах магниторезистивной памяти.

В основе подавляющего большинства предложений спинового транзистора лежит идея Датты и Даса, основанная на спин-орбитальном взаимодействии. В 2001 г. Гуржи предложил совершенно другой тип спинового полевого транзистора [9], основанный на спиновом – специальной гибридной структуре – магнитный проводник + немагнитный полупроводник, которая, в принципе, может быть использована для генерации и усиления переменного спинового сигнала [10]. Управление в нем основано на обычном кулоновском взаимодействии. Заметим, что спиновый диод, принципиально был реализован Шмидтом в 2001 г. По-видимому, наращивая слои магнитного проводника и немагнитного полупроводника, можно реализовать приемлемый для практического использования спиновый диод. В литературе также упоминается развиваемый в работах Вольфа, Жанга спин-зависимый электронный транспорт в магнитных мультислойных структурах типа $(N/F)_n(N)^{\text{buffer}}(F/N)_m$, где F – ферромагнетик, N – немагнитный металл, m и n – число повторяющихся слоев. Толщины N слоев в $(N/F)_{n,m}$ наборах достаточно малые ($\sim 5 \text{ \AA}$) так, что соседние F слои имеют ферромагнитную связь, а толщина $(N)^{\text{buffer}}$ – слоя большая ($\sim 20 \text{ \AA}$), для того чтобы общая намагниченность $(N/F)_n$ и $(N/F)_m$ могла меняться от параллельной до антипараллельной ориентаций, под действием внешнего магнитного поля. В случае рассматриваемой многослойной структуры при одном на-

правлении намагнитченности, когда импульсы Ферми в $N(\text{Cu})$ и $F(\text{Co})$ слоях отличаются, часть слоев соответствует квантовым ямам, так что электрон многократно отражается от граничных интерфейсов. При другом направлении этого не происходит. С другой стороны, в 2002 г. Изюмов и др. развили теорию эффекта близости для искусственных наноструктур (F/S) [2], где S – высокотемпературный сверхпроводник, применительно к созданию управляющих элементов нового типа (спиновых переключателей). В таких гибридных структурах помимо конкуренции между магнитными состояниями возникает конкуренция между o - и n -фазными типами сверхпроводимости, что приводит к значительному числу логических вариантов работы возможных устройств управления, хранения и обработки информации.

Спинтроника позволит создавать компьютеры с мгновенным включением. Причина та же. Если спины были предварительно упорядочены определенным образом, они остаются таковыми, пока магнитное поле не изменит этого упорядочения. А это означает, что все данные будут доступны сразу же по включении компьютера.

3. Спиновый транзистор в гетероструктурах на основе сплава Гейслера. Здесь впервые выясняются условия протекания и усиления спинового тока в структуре полупроводник (Sem) – диэлектрик (D) – ферромагнитный сплав Гейслера (FG) с учетом действия температуры и внешнего магнитного поля. Передача колоссальных напряжений до $\sim 10^5$ атм. в токонесущую пленку устройства от подложки структуры, выполненной на основе ферромагнетика с памятью формы [11], вызовет искривление и возникновение новых зон для электронов в полупроводнике с учетом их спиновой ориентации вследствие спин-ионного взаимодействия приграничных слоев рассматриваемой гетероструктуры. Предполагается, что импульсы Ферми носителей заряда в междоузельных промежутках отличаются. Часть их соответствует квантовым ямам, так что электрон несколько раз отражается от граничных интерфейсов, и, в зависимости от приложенного внешнего воздействия, направление спина либо сохраняется, либо происходят процессы спин-флипа. Ожидается, что при преобладании e - e взаимодействия над электронно-примесным (гетеропереходы на основе GaAs, где наблюдалось паузельевское течение электронного газа) “проходные” \uparrow электроны рассеиваются на “толпе” \downarrow электронов. Данное обстоятельство является одним из механизмов управления спинполяризационным током. При получении наноразмерных гетероструктур необходимо использовать наиболее распространенный метод получения многослойных структур – метод молекулярно-лучевой эпитаксии. Предполагается использовать средства магнитосиловой микроскопии для регистрации спиновых токов, обладающие предельным теоретическим разрешением до 10^{-3} Å, т.е. фемтометрический диапазон измерений. Реализация считывания “ \uparrow ” и “ \downarrow ”- компонент спинового тока двухпараметрическим датчиком позволит повысить достоверность передаваемой цифровой информации вследствие ее взаимодополняемости.

Магнетики на основе Ni–Mn–Ga, в силу возникновения в них гигантских (до 10 %) магнитодеформаций в области структурного мартенситно-аустенитного фазового перехода [12], окажутся весьма полезными при создании предлагаемых устройств. Предполагается, что существование резко выделенных нестингов поверхности Ферми ферромагнитной пленки металлического сплава будет благоприятствовать переориентации спинов носителей заряда в полупроводниковой пленке. Для этого необходимо провести выяснение условий протекания спинового тока в модифицированных МОП-структурах и его усиления с помощью температуры и/или магнитного поля, локально создаваемых в подложке структуры на основе ферромагнитной матрицы сплава Гейслера. С помощью использования компьютерных моделей расчета $d(f)$ -атомных орбиталей и их взаимодействия со спинами электронов в сильно деформированной кристаллической решетке полупроводника демонстрируется приемлемый для практического использова-

ния коэффициент усиления спинового транзистора. Выяснены условия протекания и усиления спинового тока в гетероструктуре полупроводник-окисел (диэлектрик) – ФСГ с учетом действия температуры и/или внешнего магнитного поля. Передача колоссальных напряжений ~ 10 ГПа в токопроводящую пленку гетероструктуры от ее подложки (см. рис. 3), выполненной из ФСГ, вызовет искривление и возникновение новых зон для носителей заряда в полупроводнике с учетом их спиновой поляризации вследствие спин-ионного взаимодействия в приграничных слоях транзистора. Окисел (диэлектрик) служит для полного устранения токов утечки в МО(Д)П структуре.

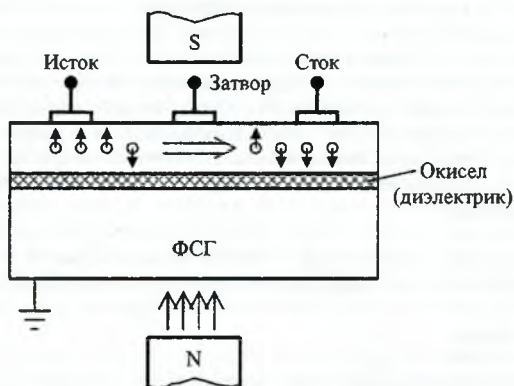


Рис. 3. Полевой спиновый транзистор – спиновод с магнитным затвором

При этом можно заставить спиновые компоненты тока управлять друг другом и добиться усиления спинового сигнала. Деформация зонной структуры полупроводника оценивалась методом расчета электронной структуры кристаллов FPLMTO, при этом устанавливалась поляризация зоны проводимости. Реализация записи, хранения и передачи информации на атомно-молекулярном уровне по-прежнему остается весьма актуальной ввиду многократного улучшения параметров таких устройств, работающих на чисто квантовых эффектах. Переход к спиновым переключателям на атомном уровне обеспечит следующие предельные характеристики устройств: быстродействие ~ 1 ТГц, энергопотребление – затраты на 1 бит информации порядка энергии одного кванта, плотность монослойной записи – 10 Тбит/мм².

Заключение

Создание теоретических основ принципиально новой технологии реализации спинового и поляризационного транзисторов при ее экспериментальном подтверждении позволит осуществить существенный прорыв в создании процессорной техники, динамической и статической компьютерной памяти, в том числе, и сменных носителей. Используя традиционные полупроводники к настоящему времени фирма Интел освоила технологический процесс 65 нм, при заявленной ими перспективной возможности создавать единичные транзисторы на два порядка меньшего размера. Однако в объеме полупроводника такого элемента будет содержаться всего несколько носителей заряда, т.е. достигается физический предел для данной технологии. Указанная технология в

настоящее время позволяет достигать частот 4–5 ГГц, но это, однако, не означает, что для предельного по размерам элемента верхняя частота на два порядка повысится, т.к. время переключения транзистора определяется, преимущественно, не временем пробега электрона через базу транзистора, а релаксационными процессами на границах p - n -переходов, которые существенно понизить невозможно.

Отметим, что сегодняшние успехи фирмы Интел в создании полупроводниковых приборов обусловлены использованием предварительно продеформированного или напряженного кремния и шести (семи)-слои́мым расположением транзисторов по глубине полупроводниковой пластины. Нами также рассматривается то обстоятельство, что полупроводник будет сильно деформирован подложкой из магнитоуправляемого сплава Гейслера. Спиновый транзистор является первым шагом по использованию спиновых степеней свободы электронов в микроэлектронике, т.е. атомного уровня для обработки информации. Развитие принципов создания датчиков для записи и считывания спиновой информации позволит расширить применение магнитосило́вой микроскопии высокого разрешения. Полученные результаты должны оказаться полезными при разработке квантового компьютера, реализации квантового запутывания при передаче информации (абсолютное ее нераспознавание), а также при создании систем распределенных вычислений и действий.

Автор выражает благодарность ГКПНИ «Наноматериалы и нанотехнологии», БРФФИ и РФФИ Ф04Р-080 за финансовую поддержку проведенных исследований.

Список литературы

1. S. Datta, B. Das. Appl. Phys. Lett., 1991, Vol. 56, P. 665.
2. Ю.А. Изюмов, Ю.Н. Прошин, М.Г. Хусаинов. УФН, 2002, Т. 172, С. 113.
3. А.Н. Васильев, В.Д. Бучельников, Т. Такаги, В.В. Ховайло, Э.И. Острич. Ферромагнетики с памятью формы. УФН, 2003, Т. 173, №6, С. 577-608.
4. Ю.А. Кузавко, В.Г. Шавров В.Г. Поляризационная магнитооптическая бистабильность (ПМОБ) в магнитных пленках со спиновой переориентацией. Тезисы докладов XII Всесоюзной школы-семинара "Новые магнитные материалы микроэлектроники, Новгород, 1990, ч. 2, С. 97.
5. Ю.А. Кузавко, В.Г. Шавров В.Г. Поляризационная магнитооптическая бистабильность в пленках ферритов. Тез. докл. XIX Всес. конф. по физике магнитных явлений, Ташкент, 1991, ч. 1, С. 114-115.
6. Yu. A. Kuzavko, V. G. Shavrov. Polarization magneto-optic bistability in films. Digests of the Inter-mag conference. St. Louis, Missouri, USA, 1992, P. JQ-09.
7. Ю.А. Кузавко. Поляризационные магнитооптические бистабильности в антиферромагнитных пластинках. Тез. докл. Междуна. Конф. по оптике полупроводников. Минск, 1999, С. 114-115.
8. Yu. Kuzavko. Controlling the spin current in smart materials based structures. Dig. of 8th Conference on Intermolecular and Magnetic Interactions in Matter, Poland, Nalenczow, 2005, P. 47.
9. Р.Н. Гуржи., А.Н. Калинин., А.И. Копелиович., А.В. Яновский. ФНТ, 2001, V. 27, P. 1332.
10. R.N. Gurzhi, A.N. Kalinenko, A.I. Kopeliovich, A.V. Yanovsky, A.V. Bochachek, Uzi Landman. Phys. Rev. B. 2003, V. 68, N 125, P. 113.
11. Ю.А. Кузавко, В.Г. Шавров. Нано- и микрокристаллические образцы сплавов Гейслера с точки зрения акустики диссипативных сред. Материалы 43-й Междуна. конф. «Актуальные проблемы прочности», Витебск, 2004, ч. 2, с. 152.
12. М.М. Карпук, Д.А. Костюк, Ю.А. Кузавко, В.Г. Шавров. Особенности распространения акустических волн через границу жидкость - ферромагнитный сплав Гейслера. Акустич. журн., 2005, Т. 51, № 5, С. 665 – 673.