

МИКРОЭЛЕКТРОННЫЕ ПРИБОРЫ И СИСТЕМЫ MICROELECTRONIC DEVICES AND SYSTEMS

УДК 681.124.23; 621.377.623.22

Обзор

Спиновые инжекторы и транзисторы для кремниевой спинтроники

Н.И. Плюснин

*Институт автоматизации и процессов управления
Дальневосточного отделения Российской академии наук (г. Владивосток)*

Review

Spin Injector and Transistors for Silicon Spintronics

*Institute of Automation and Control Processes
of Far East Branch of the Russian Academy of Sciences, Vladivostok*

N.I. Plyusnin

Приведен обзор литературных данных по электрическим спин-инжекторам и транзисторам для кремниевой спинтроники, рассмотрено современное состояние исследований в этой области. Выделены основные этапы получения соответствующих туннельных магнитных контактов. Описаны различные структуры для инжекции спина в кремний, контактные материалы, а также возможные конструкции транзисторов для применения в кремниевой спинтронике. Намечены перспективные направления дальнейших исследований.

Ключевые слова: Si; ферромагнитные металлы; диэлектрики; сплавы Гейслера; электрическая спин-инжекция; эпитаксиальные пленки; туннельный контакт; барьер Шоттки; спинтроника; спиновые транзисторы; КМОП интегральные схемы.

A review of the literature data on electric injectors and spin transistors for silicon spintronics and the current state of researches has been presented. The basic stages of obtaining the corresponding magnetic tunnel contacts have been distinguished. Various structures for spin injection into silicon, the contact materials and the possible design of spin transistors for silicon spintronics have been described. The promising directions for further research have been outlined.

Keywords: Si; ferromagnetic metals; dielectrics; Geisler alloys; electric spininjection; epitaxial films; tunnel contact; Schottky barrier; spintronics; spin transistors; CMOS integrated circuits.

© Н.И. Плюснин, 2016

Введение. На настоящем этапе развития микро- и нанoeлектроники закон масштабирования интегральных схем перестает работать. Это вызывает необходимость использования новых подходов к повышению производительности интегральных схем. Один из них – использование в качестве носителя информации в интегральных схемах не только заряда, но и спина электрона, т.е. использование спиновых устройств.

Спиновые устройства полупроводниковой электроники строятся в основном с элементами, которые служат для инжекции в полупроводник спин-поляризованных электронов, манипулирования их спином и его детектирования [1–3]. Основные методы спиновой инжекции – это электрическая [1], оптическая [1], динамическая [4, 5] и тепловая [6] инжекции. В настоящей работе рассматривается электрическая инжекция спина из ферромагнитного контакта в кремний как наиболее подходящая для интеграции с кремниевой микроэлектроникой. Кроме того, основное внимание уделено спиновым инжекторам и транзисторам, работающим при комнатной и более высокой температуре, что требуется для их применения на практике.

Цель работы – обзор данных по спин-инжекторам и материалам для кремниевой спинтроники, анализ структуры и магнитных свойств этих материалов, выбор конкретного типа материала, наиболее подходящего для спин-инжекции в кремний.

В работе рассмотрены материалы для спиновых инжекторов, ферромагнитные туннельные контакты к полупроводнику (кремнию) через изолятор (оксид) и барьер Шоттки, роль интерфейсов, а также полевые спин-транзисторы на основе магнитных туннельных контактов (МТК), управляемые как электрическим, так и магнитным полем и совместимые с кремниевой технологией.

Магнитные туннельные контакты.

Электрическая спиновая инжекция при комнатной и более высоких температурах, как правило, осуществляется из ферромагнитных металлов и полуметаллических ферромагнетиков (ПМФ). Ферромагнитные металлы (Fe, Co, Ni и Gd) и их сплавы имеют высокую температуру Кюри, хорошие характеристики переключения магнитного состояния и высокий уровень технологии их получения. Они имеют полуметаллическую и спин-расщепленную зонную структуру (рис.1), а также наивысший уровень намагниченности. Тем не менее несоответствие сопротивления ферромагнитных металлов сопротивлению полупроводника уменьшает спин-инжекцию [1, 7].

В начале 2000-х гг. были определены условия для эффективной спин-инжекции из ферромагнитного металла в полупроводник. Одно из условий означает, что отношение (r^*/r) туннельного сопротивления контакта r^* к сопротивлению полупроводника r должно быть в интервале от t/l до l/t , где t – глубина инжекции; l – длина диффузии

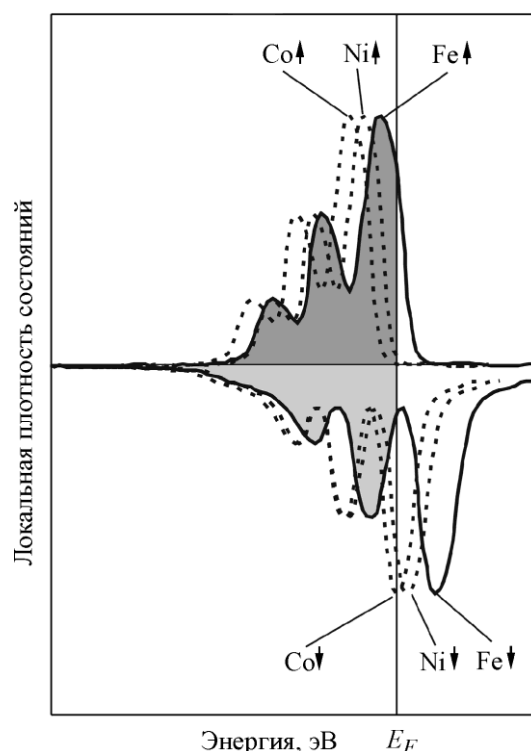


Рис.1. Плотность электронных состояний для спин-расщепленной электронной ОЦК-структуры Fe, Co и Ni (по данным [12])

спина в полупроводнике [4]. В этой связи выяснилось, что необходимо использовать ферромагнитный контакт с высокой величиной электрического сопротивления [8, 9]. Для этого при создании МТК стали использовать туннельные переходы Шоттки или изолирующие туннельные переходы [10].

Поиск эффективных МТК к полупроводнику происходил в два этапа: до 2004 г. получали аморфные МТК, которые показывали низкие величины отношения туннельного магнитосопротивления (ТМС) при переключении магнитного поля, позднее стали получать кристаллические и эпитаксиальные МТК со значительно более высокими значениями отношения ТМС [11].

Первые эффективные МТК с изолирующим туннельным переходом появились лишь в 1991 г. и представляли собой контакт к металлу (Co) через аморфную окись алюминия, работающий только при низких температурах [13]. И лишь в 2001–2003 гг. были получены МТК к полупроводнику с Шоттки (Fe/AlGaAs [14]) и изолирующим (FeCo/AlO_x/Al(GaAs) [12]) туннельными переходами, которые работали при комнатной температуре.

К 2004 г. было выполнено прямое сравнение МТК Fe/Al₂O₃/AlGaAs и Fe/AlGaAs, которое показало более высокую спин-поляризацию (40%) для изолирующего туннельного перехода (Fe/Al₂O₃/AlGaAs) [15]. Тогда же были теоретически найдены условия для эффективной спин-инжекции в полупроводник – использование в полупроводнике вблизи интерфейса более высоких значений электрического поля [16], минимальной толщины области обеднения [17] и невырожденного уровня легирования [18] (см. обзор [1]). Кроме того, в 2004 г. было получено высокое значение отношения ТМС при комнатной температуре (~220%) в эпитаксиальном МТК (CoFe/MgO/CoFe) к металлу с изолирующим переходом на MgO [19]. Оказалось, что MgO хорошо сочетается на границе раздела с ферромагнитными металлами и сплавами, и поэтому с изолирующим переходом на МТК MgO стали основой энергонезависимых схем металлической спинтроники.

Эти успехи привели к созданию эффективных спин-инжекторов в полупроводник. В частности, ожидали высокую спин-инжекцию из ферромагнитного металла через эпитаксиальный MgO или другие эпитаксиальные изоляторы в полупроводник. Поэтому после 2004 г. эти изоляторы в сочетании с легированием приграничной области полупроводника вышли на передний план [11]. В результате была получена эффективная инжекция из CoFe/MgO в GaAs (более 32% при 290 К) [20], из Fe/Al₂O₃ в *n*-Si (30% при 5 К) [21] и из Ni₈₀Fe₂₀/Al₂O₃ в *n*-Si (4,6% в 300 К) [22], хотя степень эпитаксиальности этих контактов на полупроводниках в действительности была низкой.

Роль туннельного интерфейса и новые материалы. Роль интерфейса ранее исследована в теоретических работах [23–28]. Было показано, что увеличение *sd*-связей на интерфейсе в туннельных контактах уменьшает спин-поляризацию и даже приводит к изменению ее знака [23] и плотность состояний для мажоритарных и миноритарных спинов на интерфейсе металла и полупроводника отличается от плотности состояний в их объеме [24]. Кроме того, локализованные интерфейсные состояния могут даже инвертировать знак магнитосопротивления МТК из-за резонансного туннелирования через эти состояния [25]. Увеличение атомного разупорядочивания на интерфейсе туннельного барьера также уменьшает величину спин-поляризации [26, 27]. Важную роль в спин-инжекции играют сила связи на интерфейсе и конфигурация атомного потенциала (структуры Co/вакуум/Al, Co/Al₂O₃/Co, Fe/MgO/Fe, Co/SrTiO₃/Co и др. [28]). На рис.2 проиллюстрировано влияние факторов атомного взаимодействия на упорядоченном интерфейсе на локальную со спином «вверх» и спином «вниз» плотность интерфейсных состояний.

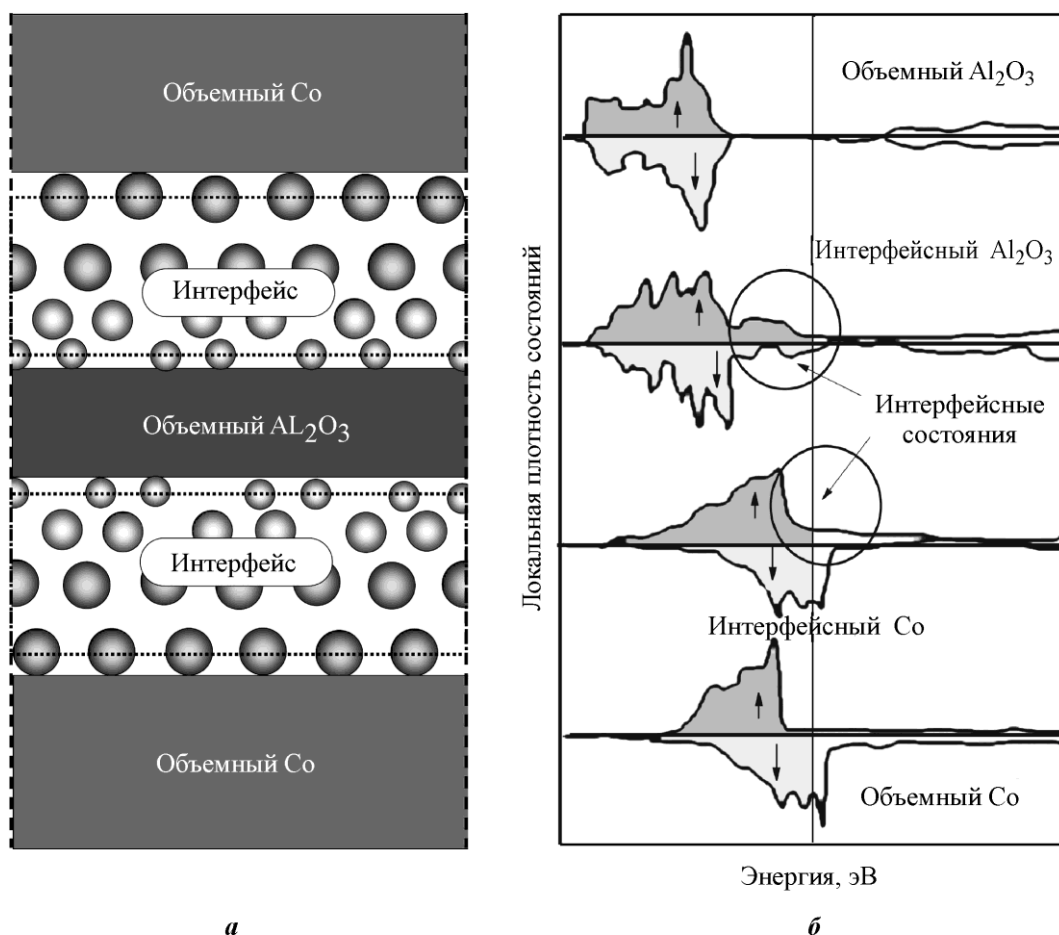


Рис.2. Атомная структура на границах раздела МТК Co/Al₂O₃/Co (а) и влияние межатомных взаимодействий на локальную плотность спиновых состояний (б) (по данным [30])

В целом спин-поляризация уменьшается с увеличением атомного разупорядочения (дислокации, дефекты упаковки, вакансии) на границе раздела, а также в самом изоляторе. Аналогичное влияние оказывают изменения состава в результате взаимодиффузии через границу раздела. При низкой температуре велика роль примесей. Кроме того, имеет значение геометрическая шероховатость границы раздела, приводящая к изменению толщины изолирующего слоя.

Для спин-инжекции в различные слои (металлы, полупроводники) используются разные типы материалов (рис.3).

Успехи в создании эффективных спин-инжекторов в металлы и полупроводники, прежде всего, связаны с новыми ферромагнитными и изолирующими материалами. Так, теоретический анализ спин-туннелирования в эпитаксиальных Co(001)/SrTiO₃/Co(001) переходах предсказывает не только высокую степень переноса спин-поляризации на интерфейсе Co/SrTiO₃ (благодаря эффективному туннелированию миноритарных *d*-электронов), но и большой ТМС-эффект [31]. Кроме того, некоторые сегнетоэлектрики могут открыть новые перспективы для устройств на основе МТК и ТМС-эффектов [32]. Что касается ферромагнитных материалов, которые обеспечивают высокие температуры Кюри, то в последние годы привлекли значительное внимание полуметаллические сплавы Гейслера (см. обзор [33]). Это объясняется тем, что спин-расщепленная плотность электронных состояний в сплавах Гейслера имеет две отдельные части вблизи уровня Ферми: полуметаллическую – без энергетической щели и со спином «вниз» и



Рис. 3. Типы материалов, использующихся в магнитных туннельных контактах и спиновых инжекторах

диэлектрическую – с энергетической щелью и со спином «вверх». Поэтому в этом классе материалов можно ожидать 100%-ную спиновую поляризацию. Другое важное качество этих сплавов – возможность подобрать сплав, который можно вырастить на кремнии эпитаксиально. Тем не менее значение намагниченности в сплавах Гейслера значительно ниже, чем в ферромагнитных металлах.

Вопрос об эпитаксиальности контакта может уйти на второй план, если использовать аморфный диэлектрик, который может иметь низкую плотность граничных состояний с кремнием. Это справедливо в случае контакта SiO₂ с монокристаллическим Si, который обеспечивает низкую плотность интерфейсных состояний. Кроме того, SiO₂ является эффективным диффузионным барьером между кремнием и другими диэлектриками. В 2009 г. использование SiO₂ для туннельного барьера позволило получить 30%-ную величину поляризации спина электрона в кремнии при $T = 5\text{--}50\text{ K}$ [34], а в 2010 г. сформирована высококачественная структура МТК с диффузионным барьером из SiO_xN_y [35].

В 2011 г. было показано, что с использованием SiO₂ спин-инжекция в кремний возможна до 500 К [36]. На сегодняшний день инжекция спина в Si почти достигла уровня требований к практическим устройствам для коммерческих, промышленных и военных (рабочие температуры 340, 375 и 400 К соответственно) применений. Однако остается вопрос о плотности инжектированного тока.

МТК с барьером Шоттки. В 2002 г. удалось получить эффективную (30%) спин-инжекцию в контакте Fe/AlGaAs при комнатной температуре [37]. Поэтому за прошедшие 15 лет внимание к МТК с барьером Шоттки для спин-инжекторов в кремний не ослабело. Отметим, что барьер Шоттки имеет наибольший ток инжекции и обеспечивает практически готовый и надежный путь для интеграции спинового транспорта в по-

лупроводниковую микроэлектронику. Кроме того, треугольная интерфейсная область тунnelирования барьера Шоттки создает спин-зависимое сопротивление.

Тем не менее значительная по ширине область обеднения барьера Шоттки нежелательна для спин-инъекции. С понижением уровня легирования барьер Шоттки становится более широким, в нем возрастает сопротивление контакта и наблюдается диодное поведение [38]. При этом широкий энергетический ландшафт барьера Шоттки изменяет механизм транспорта от тунnelирования до тепловой эмиссии и значительно затрудняет эффективную спин-инжекцию [39]. Из-за широкого барьера Шоттки состояния полупроводника, расположенные вблизи интерфейса, могут рассматриваться как промежуточные – для тунnelирования и создавать слой накопления спина, где время жизни спина очень велико [40].

Дизайн профиля легирования очень важен для увеличения эффективной спин-инъекции. Один из методов дизайна – формирование сильнолегированного δ -слоя вблизи интерфейса, который приводит к острой и узкой треугольной форме потенциала барьера Шоттки [41]. На рис.4 схематически показана конструкция идеального с точки зрения эффективности спин-инжектора с барьером Шоттки к кремнию (рис.4,а), а также зонная диаграмма области спин-инъекции (рис.4,б).

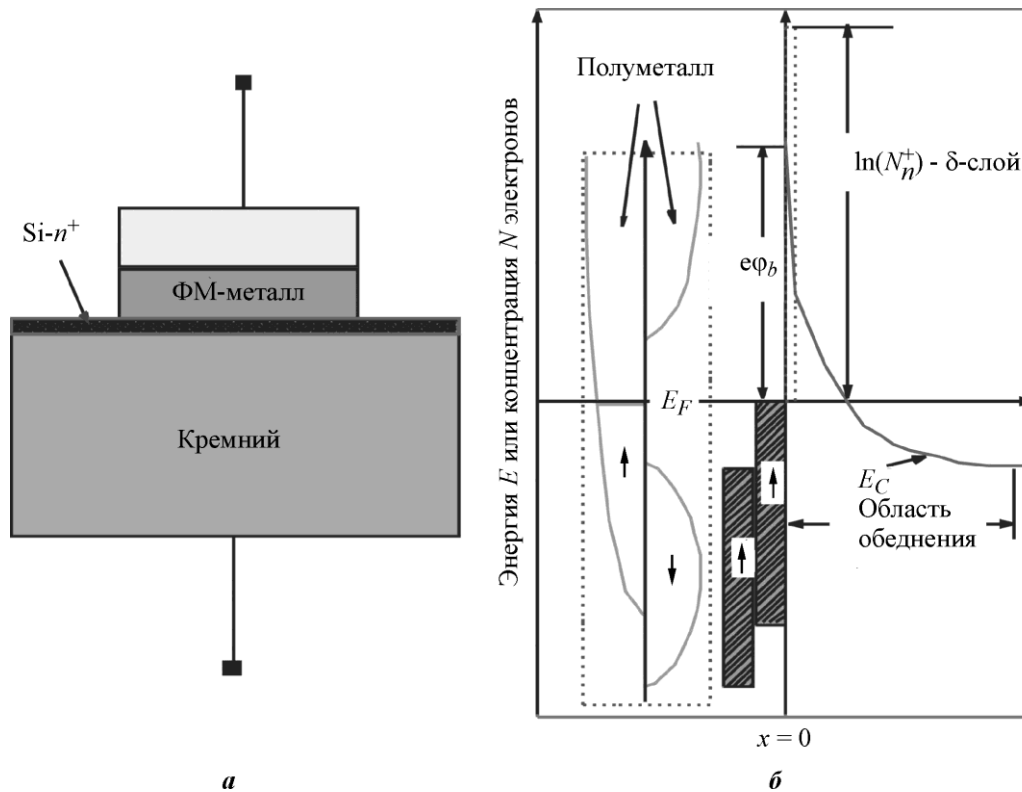


Рис.4. Структура идеального спин-инжектора с барьером Шоттки к кремнию (а) и зонная диаграмма области его спин-инъекции (б)

Другой метод дизайна – формирование в туннельном барьере ультратонкого металлического слоя с низкой работой выхода (Gd, Cs и т.д.) [38, 42]. Предложен новый метод: в интерфейс ферромагнитного кремния встроены двумерные (2D) промежуточные слои графена [43]. Это позволило получить значение произведения сопротивления контакта на его площадь ($RA = V/J$) в случае контакта NiFe/graphene/Si намного ниже, чем для контакта NiFe/SiO₂/Si. Малое значение RA очень важно для эффективной

спин-инъекции и спин-детектирования [8, 37], а также для работоспособности спиновых МОП-транзисторов [44, 45].

Строгая атомная упорядоченность при однородном составе интерфейса, которая достигается в эпитаксиальном контакте, также важна для эффективной инжекции спина в контакте ферромагнетик – полупроводник [46]. Однако существует проблема перемешивания в этом контакте. Например, для образцов Fe/GaAs, выращенных при температуре выше 35–50 °С и при покрытии меньше, чем 3,5 монослоя, наблюдается неупорядоченный граничный слой смеси переменного состава $Fe_xGa_yAs_z$ [47], который ухудшает спин-инжекцию.

КМОП-спин-транзисторы на основе МТК. Достижение эффективной спин-инъекции в кремний позволило приступить к интеграции оксидных МТК и МТК с барьером Шоттки в кремниевые МОП-транзисторы и КМОП интегральные схемы. Эта интеграция позволит либо снабдить каждый элемент (или транзистор) интегральных схем функцией энергонезависимой памяти, либо снизить его энергопотребление, либо обеспечить одновременно и то и другое.

Еще в 1990 г. была предложена идея спинового полевого транзистора с полностью электрическим переключением передаваемого крутящего момента (STTS) с использованием спин-орбитального канала Рашбы [48]. Однако эта идея на кремнии так и не реализована до сегодняшнего дня. Первые тест-структуры кремниевых спин-полевых транзисторов с переключением передаваемого крутящего момента (STTS-FET), использующие инжекцию в вырожденный Si и работающие при комнатной температуре, были созданы в 2011 г. [44]. А в 2014 г. была создана тест-структура с инжекцией спина в невырожденный Si [49]. Эта тест-структура содержала Si-канал на подложке SiO_2/Si , спин-инжектор Fe/MgO, контактирующий с каналом, и сильнолегированную (но невырожденную) область Si вблизи интерфейса MgO/Si. В этом STTS-FET был продемонстрирован угол вращения спина в канале более 4π и длина его транспорта на расстояние более 20 мкм. Тем не менее необходимо еще перейти от тест-структуры до практически применимого спин-полевого транзистора с учетом ряда требований к таким транзисторам. Прежде всего, проблема состоит в том, какой материал нужно использовать в качестве спин-орбитального канала Рашбы. Двумерные материалы обычно функционируют при очень низких температурах, а массивные материалы, такие как кремний, требуют больших электрических полей для вращения направления спина в канале [48].

Большие надежды были связаны со спиновыми МОП-транзисторами (SFET), использующими в качестве материалов стока и истока ПМФ, а также барьер Шоттки в качестве туннельного перехода, поскольку эти транзисторы более пригодны для интеграции в кремниевую МОП-технологию. Их создание было теоретически предсказано еще в 2004 г. [45], но полная функциональность была экспериментально продемонстрирована недавно [50] благодаря решению проблемы роста стабильного ПМФ на основе сплава Гейслера с высокой температурой Кюри. Этот спиновый МОП-транзистор (схематически его конструкция и зонные диаграммы представлены на рис.5) построен с учетом основных требований к практически применимым спин-транзисторам: наибольшее отношение спинового тока; наивысшая проходная проводимость; наивысшее усиление по напряжению, току и/или мощности; наименьшие произведение задержки на мощность и рассеиваемая мощность в выключенном состоянии; наиболее простая структура [45].

Важная особенность спинового МОП-транзистора в том, что он подобен обычным МОП-транзисторам с металлическими истоком/стоком (без $p-n$ -переходов), за исключением того, что контакты исток/сток из ПМФ. Это делает его легко адаптируемым к существующей технологии и удешевляет его производство. Принцип работы устройства основан на различии барьеров Шоттки для металлических и изолирующих спиновых зон ПМФ-контактов. В параллельной магнитной конфигурации спиновый МОП-транзистор работает как обычный МОП-транзистор (см. рис.5,а), в то время как в антипараллельной конфигурации полуметаллический контакт стока создает барьер для поляризованных спин-электронов (см. рис.5,б).

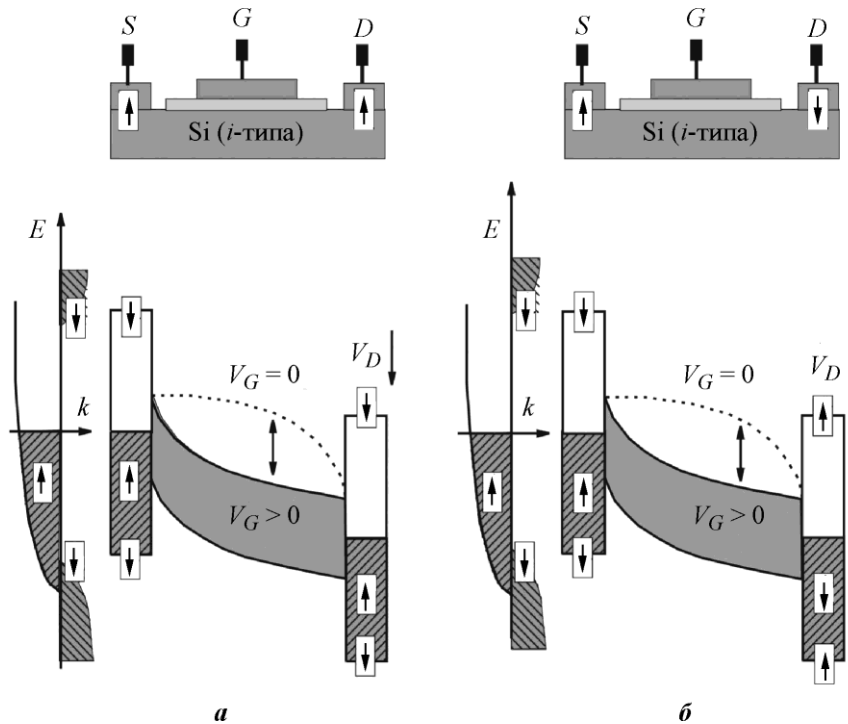


Рис.5. Спин-транзистор с инжектором, с барьером Шоттки, управляемым полем (на затворе G) и его зонная диаграмма: направление намагничивания стока S и истока D одинаково (а) и противоположно (б)

На сегодняшний день актуальным также является создание кремниевых (германиевых) полевых спин-транзисторов с нанопроволочным каналом, который обеспечивает гораздо большее время жизни спина и длины спиновой диффузии, чем в объемных материалах. И первые успехи в создании таких транзисторов, работающих при комнатной температуре, уже достигнуты [51]. В качестве ферромагнитных металлов спин-инжекторов этих транзисторов использованы CoFe , Fe , Fe_3Si и Mn_5Ge_3 , выращенные с помощью молекулярно-лучевой эпитаксии (МЛЭ). В качестве туннельных барьеров наряду с барьером Шоттки использованы изолирующие переходы на MgO (выращенном с помощью МЛЭ) и Al_2O_3 (полученном окислением тонкого слоя Al), собственные оксиды (SiO_2 и GeO_x), а в качестве самого нанопроволочного канала – монокристаллические Si , Ge и сплавы GeSi . Чтобы зафиксировать уровень Ферми и добиться низкого значения барьера Шоттки, на границе раздела между ферромагнитным металлом и полупроводниковым каналом встроен тонкий слой изолятора. А для получения атомарно-гладкого и тонкого интерфейса контактов к этим каналам использован быстрый термический отжиг. Тем не менее даже при этих ухищрениях величина магниторезистивного

эффекта в этих транзисторах составляла лишь доли процента и то при низких (азотных/гелиевых) температурах [51].

И только в транзисторах с нанопроволочным каналом из GaN был получен существенно больший магниторезистивный эффект, причем при комнатной температуре. Но в этом случае уже следует говорить о гибридной спинтронике, где Si используется лишь как подложка.

Совсем недавно был предложен общий подход к построению спин-транзисторов и в целом магнито-электрических схем спинтроники – модульный подход [52]. Согласно этому подходу, SFET – это, по существу, соединение в один полевой спиновый прибор различных модулей: истока/стока – спинового инжектора/детектора («FM/NM interface module» или «magnetic tunnel junction») и полупроводникового канала («non-magnet module») или канала Рашбы с полевым управлением («Rashba spin-orbit channel»). В работе [52], кроме этих модулей, предложены и другие модули, комбинация которых позволяет реализовать разные спин-приборы и их функции.

Заключение. Исторически процесс создания спин-инжекторов и спин-транзисторов связан с успехами в теории инжекции и технологии формирования интерфейсов, в частности с эпитаксиальным выращиванием материалов спин-инжекторов.

Наиболее подходящими для спин-инжекции являются ферромагнитные металлы, а также двойные и тройные полуметаллические соединения (сплавы Гейслера), состоящие из ферромагнитных и немагнитных металлов и металлоидов и обеспечивающие 100%-ную поляризацию. Выбор подходящего материала должен учитывать не только его состав, но и пригодность для гетероэпитаксии. Конечный критерий выбора материала – эффективность спин-инжекции в кремний: максимальный ток при максимальной спин-поляризации.

Для эффективной спин-инжекции в кремний необходимо согласование ферромагнитного материала с кремнием посредством туннельного барьера и уменьшение высоты барьера с помощью двумерных металлических, полуметаллических или диэлектрических прослоек.

Перспективы в создании кремниевых спин-инжекторов и спин-транзисторов связаны с поиском новых и созданием искусственных материалов, дизайном электронной структуры интерфейса с использованием нано- и 2D-слоев и оптимизацией технологии с целью сочетания высокой работоспособности приборов и их дешевизны.

Автор выражает благодарность чл.-корр. РАН А.А. Горбачевичу за ценные замечания при обсуждении результатов.

Работа частично выполнена в рамках проекта Российского научного фонда и Программы «Дальний Восток» (проект №15-1-4-008 о).

Литература

1. **Schmidt G.** Topical review: Concepts for spin injection into semiconductors: a review // J. of Physics D Appl. Phys. – 2005. – Vol. 38. – P. R107–R122.
2. **Jansen R.** Silicon spintronics // Nature Materials. – 2012. – Vol. 11. – P. 400–408.
3. **Hirohata A., Takanashi K.** Future perspectives for spintronic devices // J. of Physics D: Appl. Phys. – 2014. – Vol. 47. – 193001 (40 p.).
4. **Fert A., Jaffres H.** Conditions for efficient spin injection from a ferromagnetic metal into a semiconductor // Phys. Rev.B. – 2001. – Vol. 64. – 184420 (9 p.).
5. **Ando K.** Dynamical generation of spin currents // Semiconductor Science and Technology. – 2014. – Vol. 29. – 043002 (13 p.).

6. **Jansen R., Deac A.M., Saito H., Yuasa S.** Thermal spin current and magnetothermopower by Seebeck spin tunneling // *Phys. Rev.B.* – 2012. – Vol. 85. – 094401 (8 p.).
7. Fundamental obstacle for electrical spin injection from a ferromagnetic metal into a diffusive semiconductor / **G. Schmidt, D. Ferrand, L. W. Molenkamp et al.** // *Phys. Rev.B.* – 2000. – Vol. 62. – P. R4790–R4793.
8. **Rashba E.I.** Theory of electrical spin injection: Tunnel contacts as a solution of the conductivity mismatch problem // *Phys. Rev.B.* – 2000. – Vol. 62. – P. R16267–R16270.
9. **Sarma S.D., Fabian J., Hu X., Žutić I.** Theoretical perspectives on spintronics and spin-polarized transport // *IEEE Transactions on Magnetics.* – 2000. – Vol. 36. – P. 2821–2826.
10. **Miao G.X., Münzenberg M., Moodera J.S.** Tunneling path toward spintronics. // *Reports on Progress in Physics.* – 2011. – Vol. 74. – P. 036501 (19 p.).
11. **Zhu J.G.J., Park C.** Magnetic tunnel junctions // *Materials Today.* – 2006. – Vol. 9. – P. 36–45.
12. Highly efficient room temperature spin injection in a metal-insulator-semiconductor light-emitting diode / **P. Van Dorpe, V. F. Motsnyi, M. Nijboer et al.** // *Japanese J. of Appl. Phys.* – 2003. – Vol. 42. – P. L502–L504.
13. **Miyazaki T., Yaoi T., Ishio S.** Large magnetoresistance effect in 82Ni-Fe/Al-Al₂O₃/Co magnetic tunneling junction // *J. of Magnetism and Magnetic Materials.* – 1991. – Vol. 98. – P. L7–L9.
14. Room-temperature spin injection from Fe into GaAs / **H.J. Zhu, M. Ramsteiner, H. Kostial et al.** // *Phys. Rev. Letters.* – 2001. – Vol. 87. – 016601 (4 p.).
15. Comparison of Fe/Schottky and Fe/Al₂O₃ tunnel barrier contacts for electrical spin injection into GaAs / **Van't Erve, O. M. J. Kioseoglou, G. Hanbicki et al.** // *Appl. Phys. Letters.* – 2004. – Vol. 84. – P. 4334–4336.
16. **Yu Z.G., Flatté M.E.** Spin diffusion and injection in semiconductor structures: Electric field effects // *Phys. Rev.B.* – 2002. – Vol. 66. – 235302 (14 p.).
17. **Albrecht J.D., Smith D.L.** Spin-polarized electron transport at ferromagnet / semiconductor Schottky contacts. *Phys. Rev.B.* – 2003. – Vol. 68. – 035340 (14 p.).
18. **Osipov V.V., Bratkovsky A.M.** Efficient nonlinear room-temperature spin injection from ferromagnets into semiconductors through a modified Schottky barrier // *Phys. Rev.B.* – 2004. – Vol.70. – 205312 (6 p.).
19. Giant tunnelling magnetoresistance at room temperature with MgO(100) tunnel barriers / **S.S. Parkin, C. Kaiser, A. Panchula et al.** // *Nature materials.* – 2004. – Vol. 3. – P. 862–867.
20. Highly spin-polarized room-temperature tunnel injector for semiconductor spintronics using MgO (100) / **X. Jiang, R. Wang, R.M. Shelby et al.** // *Phys. Rev.Letters.* – 2005. – Vol. 94. – 056601 (4 p.).
21. Electrical spin-injection into silicon from a ferromagnetic metal/tunnel barrier contact / **B.T. Jonker, G. Kioseoglou, A.T. Hanbicki et al.** // *Nature Physics.* – 2007. – Vol. 3. – P. 542–546.
22. Electrical creation of spin polarization in silicon at room temperature / **S.P. Dash, S. Sharma, R.S. Patel et al.** // *Nature.* – 2009. – Vol. 462. – P. 491–494.
23. **Tsymbal E.Y., Pettifor D.G.** Modelling of spin-polarized electron tunnelling from 3d ferromagnets // *J. of Physics: Condensed Matter.* – 1997. – Vol. 9. – P. L411–L417.
24. Electronic structure of FM| semiconductor| FM spin tunneling structures. / **W.H. Butler, X.G. Zhang, X. Wang et al.** // *J. of Appl. Phys.* – 1997. – Vol. 81. – P. 5518–5520.
25. **Tsymbal E.Y., Sokolov A., Sabirianov I.F., Doudin B.** Resonant inversion of tunneling magnetoresistance // *Phys. Rev.Letters.* – 2003. – Vol.90. – 186602 (4 p.).
26. **Zhang S., Levy P.M.** Models for magnetoresistance in tunnel junctions // *The European Physical Journal B-Condensed Matter and Complex Systems.* – 1999. – Vol. 10. – P. 599–606.
27. **Tsymbal E.Y., Pettifor D.G.** Spin-polarized electron tunneling across a disordered insulator // *Phys. Rev.B.* – 1998. – Vol. 58. – P. 432–437.
28. Interface effects in spin-dependent tunneling / **E.Y. Tsymbal, K.D. Belashchenko, J.P. Velev et al.** // *Progress in Materials Science.* – 2007. – Vol. 52. – P. 401–420.
29. **Oleinik I.I., Tsymbal E.Y., Pettifor D.G.** Structural and electronic properties of Co/Al₂O₃/Co magnetic tunnel junction from first principles // *Phys. Rev.B.* – 2000. – Vol. 62. – P. 3952–3959.
30. **Tsymbal E.Y., Mryasov O.N., LeClair P.R.** Spin-dependent tunnelling in magnetic tunnel junctions // *J. of Physics: Condensed Matter.* – 2003. – Vol. 15. – P. R109–R142.
31. Negative spin polarization and large tunneling magnetoresistance in epitaxial Co| SrTiO₃| Co magnetic tunnel junctions / **J.P. Velev, K.D. Belashchenko, D.A. Stewart et al.** // *Phys. Rev.letters.* – 2005. – Vol. 95. – 216601 (4 p.).
32. **Bibes M., Villegas J.E., Barthelemy A.** Ultrathin oxide films and interfaces for electronics and spintronics // *Advances in Physics.* – 2011. – Vol. 60. – P. 5–84.

33. **Farshchi R., Ramsteiner M.** Spin injection from Heusler alloys into semiconductors: A materials perspective // J. of Appl. Phys. – 2013. – Vol. 113. – 191101 (15 p.).
34. Electrical spin injection into Si(001) through a SiO₂ tunnel barrier / **C. H. Li, G. Kioseoglou, O. M. J. van 't Erve et al.** // Appl. Phys. Lett. – 2009. – Vol. 95. – 172102 (3 p.).
35. **Hayashi K., Takamura Y., Nakane R., Sugahara S.** Formation of Co₂FeSi/SiO_xNy/Si tunnel junctions for Si-based spin transistors // J. Appl. Phys. – 2010. – Vol. 107. – 09B104 (3 p.).
36. **Li C.H., Van't Erve O. M. J., Jonker B. T.** Electrical injection and detection of spin accumulation in silicon at 500 K with magnetic metal/silicon dioxide contacts // Nature Communications. – 2011. – Vol. 2. – 245 (7 p.).
37. Efficient electrical spin injection from a magnetic metal/tunnel barrier contact into a semiconductor / **A. T. Hanbicki, B. T. Jonker, G. Itskos et al.** // Appl. Phys. Letters. – 2002. – Vol. 80. – P. 1240–1242.
38. **Min B. C., Motohashi K., Lodder C., Jansen R.** Tunable spin-tunnel contacts to silicon using low-work-function ferromagnets // Nature Materials. – 2006. – Vol. 5. – P. 817–822.
39. **Jansen R., Min B. C.** Detection of a spin accumulation in nondegenerate semiconductors // Phys. Rev. Letters. – 2007. – Vol. 99. – 246604 (4 p.).
40. Enhancement of the spin accumulation at the interface between a spin-polarized tunnel junction and a semiconductor / **M. Tran, H. Jaffrès, C. Deranlot et al.** // Phys. Rev. Letters. – 2009. – Vol. 102. – 036601 (4 p.).
41. **Albrecht J. D., Smith D. L.** Spin-polarized electron transport at ferromagnet/semiconductor Schottky contacts // Phys. Rev. B. – 2003. – Vol. 68. – 035340 (14 p.).
42. Electrical spin injection into moderately doped silicon enabled by tailored interfaces / **R. Jansen, B. C. Min, S. P. Dash et al.** // Phys. Rev. B. – 2010. – Vol. 82. – 241305 (4 p.).
43. Low-resistance spin injection into silicon using graphene tunnel barriers / **O. M. J. van 't Erve, A. L. Friedman, E. Cobas et al.** // Nature nanotechnology. – 2012. – Vol. 7. – P. 737–742.
44. Spin-based MOSFET and its applications / **Y. Saito, T. Inokuchi, M. Ishikawa et al.** // J. of the Electrochemical Society. – 2011. – Vol. 158. – P. H1068–H1076.
45. **Sugahara S., Tanaka M.** A spin metal–oxide–semiconductor field-effect transistor using half-metallic-ferromagnet contacts for the source and drain // Appl. Phys. Letters. – 2004. – Vol. 84. – P. 2307–2309.
46. **Ploog K. H.** Spin injection in ferromagnet-semiconductor heterostructures at room temperature // J. of Appl. Phys. – 2002. – Vol. 91. – P. 7256–7260.
47. Evolution of the ferromagnetic phase of ultrathin Fe films grown on GaAs(100)-4×6 / **Y. B. Xu, E. T. M. Kernohan, D. J. Freeland et al.** // Phys. Rev. B. – 1998. – Vol. 58. – P. 890–896.
48. **Datta S., Das B.** Electronic analog of the electrooptic modulator // Appl. Phys. Lett. – 1990. – Vol. 56. – P. 665–667.
49. Spin transport in nondegenerate Si with a spin MOSFET structure at room temperature / **T. Sasaki, Y. Ando, M. Kameno et al.** // Phys. Rev. Applied. – 2014. – Vol. 2. – 034005 (6 p.).
50. Spin injection, transport, and read/write operation in spin-based MOSFET / **Y. Saito, T. Marukame, T. Inokuchi et al.** // Thin Solid Films. – 2011. – Vol. 519. – P. 8266–8273.
51. **Tang J., Wang K. L.** Electrical spin injection and transport in semiconductor nanowires: challenges, progress and perspectives // Nanoscale. – 2015. – Vol. 7(10). – P. 4325–4337.
52. **Camsari K. Y., Ganguly S., Datta S.** Modular approach to spintronics. Scientific Reports. – 2015. – Vol. 5. – P. 1–13.

Поступил
14 декабря 2015 г.

Плюснин Николай Иннокентьевич – доктор физико-математических наук, доцент, главный научный сотрудник Института автоматизации и процессов управления Дальневосточного отделения РАН. *Область научных интересов:* поверхность, граница раздела, ультратонкие пленки, электронная и атомная структура, электрические, магнитные и оптические свойства, электронная спектроскопия, микроскопия и дифракция, атомно-силовая сканирующая микроскопия, рост пленок, взаимодействие металлических паров с ковалентным полупроводником, переходные и ферромагнитные металлы, кремний. **E-mail:** plusnin@iacp.dvo.ru