

(19)



**Евразийское
патентное
ведомство**

(11) **034307**(13) **B1**

(12) ОПИСАНИЕ ИЗОБРЕТЕНИЯ К ЕВРАЗИЙСКОМУ ПАТЕНТУ

(45) Дата публикации и выдачи патента
2020.01.27

(51) Int. Cl. **G11C 11/16** (2006.01)
G11B 5/39 (2006.01)

(21) Номер заявки
201700574

(22) Дата подачи заявки
2017.12.21

(54) УСТРОЙСТВО ЗАПИСИ ИНФОРМАЦИИ ДЛЯ МАГНИТОРЕЗИСТИВНОЙ ОПЕРАТИВНОЙ ПАМЯТИ

(31) **2017138165**

(56) US-A1-20120098077
US-A1-20150131371
RU-C2-2603160
US-B2-8189302
US-A1-20170279037

(32) **2017.11.01**

(33) **RU**

(43) **2019.05.31**

(71)(73) Заявитель и патентовладелец:
**ФЕДЕРАЛЬНОЕ
ГОСУДАРСТВЕННОЕ
БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ
УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО
ОБРАЗОВАНИЯ "САНКТ-
ПЕТЕРБУРГСКИЙ
ГОСУДАРСТВЕННЫЙ
УНИВЕРСИТЕТ" (СПбГУ) (RU)**

(72) Изобретатель:
**Шикин Александр Михайлович,
Рыбкина Анна Алексеевна, Рыбкин
Артем Геннадиевич, Климовских
Илья Игоревич, Скирдков Пётр
Николаевич (RU)**

(74) Представитель:
**Матвеев А.А., Матвеева Т.И., Леонов
И.Ф. (RU)**

(57) Изобретение относится к области спинтроники и компьютерных технологий и предназначено для использования в оперативных запоминающих устройствах. Магниторезистивная оперативная память состоит из двух магнитных слоев (фиксированный и свободный магнитные слои), разделенных тонким диэлектрическим туннельным барьером, и основана на перспективной технологии, в которой для хранения информации используется не электрический заряд, а магнитное состояние вещества. Однако использование внешнего магнитного поля создает технические сложности при конструировании современных устройств памяти. Магниторезистивная оперативная память с переносом спина позволяет решить эти проблемы и создавать ячейки энергонезависимой оперативной памяти с улучшенными характеристиками и на нанометровом масштабе. Для этого для изменения магнитного состояния свободного слоя в запоминающей ячейке памяти применяется не внешнее магнитное поле, а перенос спинового момента (spin-transfer torque). И для переноса спинового момента в устройстве используется контакт FM(свободн.магн.слой)/Pt, а генерация спиновых токов осуществляется в контакте графен/Au/SiC.

034307

B1

B1

034307

Изобретение относится к области спинтроники и компьютерных технологий и предназначено для использования в оперативных запоминающих устройствах.

Современное развитие вычислительной техники предъявляет высокие требования к минитюризации (уменьшению размеров) создаваемых устройств памяти, их быстродействию и энергоэффективности.

Магниторезистивная оперативная память (MRAM) имеет ряд неоспоримых преимуществ по сравнению с другими широко используемыми типами памяти в современных компьютерах (DRAM, FLASH, SRAM). Важнейшим преимуществом MRAM является энергонезависимость элементов такой памяти, т.к. для хранения информации используется не электрический заряд, а магнитное состояние вещества. Кроме того, магниторезистивная память обладает лучшими характеристиками быстродействия, чем DRAM или FLASH. Работа ячейки магниторезистивной оперативной памяти основана на эффекте туннельного магнетосопротивления при протекании тока между двумя слоями ферромагнетика, разделенными тонким слоем диэлектрика. Магниторезистивная оперативная память состоит из двух ферромагнитных слоев (здесь и далее - фиксированный и свободный магнитные слои), разделенных тонким диэлектрическим туннельным барьером. Фиксированный ферромагнитный слой имеет фиксированную намагниченность, а свободный (запоминающий) слой может менять намагниченность. Взаимная ориентация намагниченности фиксированного и свободного слоев позволяет изменять сопротивление туннельного перехода. При параллельной ориентации намагниченности в фиксированном и свободном слоях электроны могут туннелировать через немагнитный барьер, понижая тем самым электрическое сопротивление перпендикулярного магнитного туннельного перехода. При антипараллельной ориентации намагниченностей сопротивление резко возрастает. Измеряя величину электрического сопротивления ячейки, можно считать записанную информацию. Запись информации в ячейку MRAM происходит изменением ориентации намагниченности свободного слоя. Осуществить это возможно различными способами. Обычно используются две линии записи, по которым пропускают электрический ток для создания магнитного поля в области ячейки, под действием которого изменяется направление намагниченности свободного слоя. Однако этот способ требует потребления достаточной мощности, и использование внешнего магнитного поля в области ячейки MRAM доставляет технические сложности при конструировании устройств памяти и уменьшении размеров ячейки или увеличении плотности их размещения. Более эффективным способом записи информации в ячейку магниторезистивной оперативной памяти является использование технологии передачи спинового момента (spin-transfer torque effect, STT). Эта активно развиваемая перспективная технология позволяет решить проблемы, с которыми сталкивается MRAM. Магниторезистивная оперативная память с переносом спинового момента (STT-MRAM) позволяет создавать ячейки энергонезависимой оперативной памяти с улучшенными характеристиками энергоэффективности и быстродействия и на нанометровом масштабе. Для этого для изменения магнитного состояния свободного слоя в запоминающей ячейке памяти применяется не внешнее магнитное поле, а перенос спинового момента. Поэтому поиск способа управления магнитным состоянием материала через передачу спина электрона является актуальной задачей в настоящее время. Устройства, позволяющие манипулировать спинполяризованными электронами, могут быть использованы в качестве элементов памяти и логических устройств в компьютерных технологиях и перспективных квантовых компьютерах.

Существует три вида конфигурации ячейки STT-MRAM в зависимости от ориентации намагниченности в свободном и фиксированном слоях: намагниченность в плоскости слоя, перпендикулярно плоскости и смешанный тип. В ряде патентов [1, 2] рассматривается конфигурация ячейки STT-MRAM, когда электрический ток пропускается перпендикулярно структуре, состоящей из двух магнитных слоев, разделенных диэлектрическим туннельным барьером. Изолирующий слой обычно состоит из оксида алюминия (AlO_x) или оксида магния (MgO). Однако данная конфигурация обладает недостатками. Вследствие того, что ток пропускается через всю структуру магнитного туннельного перехода, зачастую для закрепления намагниченности фиксированного слоя необходимо дополнительно размещать контакт с антиферромагнитным слоем, что усложняет и удорожает конструкцию устройства.

Кроме того, процесс записи и процесс считывания происходят через всю структуру магнитного туннельного перехода, что затрудняет оптимизацию этих процессов по отдельности. При этом существенным преимуществом in-plane (намагниченность в плоскости) конфигурации ячейки STT-MRAM является то, что в тонких пленках материалов требуется приложить меньший электрический ток, чтобы ориентировать спины электронов в плоскости пленки (слоя), нежели перпендикулярно плоскости.

Известно техническое решение [3], в котором предложено использовать спиновый эффект Холла для генерации спиновых токов в немагнитном материале (изготовленного в виде проволоки) и предлагается дальнейшая передача спинового момента посредством спин-торк эффекта в ячейку магниторезистивной оперативной памяти. Таким образом, в данном устройстве используется спиновый эффект Холла для генерации спиновых токов. В качестве немагнитного материала, используемого для генерации спиновых токов, предлагаются соединения или сплавы, характеризующиеся большими углами спинового эффекта Холла, и материалы из элементов с большим атомным номером (платина, тантал, вольфрам, висмут или сплавы на основе этих элементов). Общими с заявленным устройством признаками является использование немагнитных материалов для генерации спиновых токов в ячейке магниторезистивной оперативной памяти. Недостатком данного устройства является также перпендикулярная намагничен-

ность слоев и пропускание тока через всю структуру магнитной ячейки.

Предпосылками к разработке известных технических решений были научные публикации [4, 5], в которых впервые была предложена и доказана идея генерации спин-поляризованных токов в топологических изоляторах и тонких слоях Pt при пропускании электрического тока, и было показано, что в результате спин-торк эффекта наблюдаются эффекты индуцированной намагниченности в ферромагнитных слоях на поверхности топологического изолятора или тонких слоев Pt. Вследствие спин-орбитального торк эффекта происходит передача спинового момента из нижележащего слоя топологического изолятора или тонкого слоя Pt в ферромагнитный слой. В качестве ферромагнитного слоя обычно используются слои Fe, Ni, Co или пермаллоя. Между топологическим изолятором и ферромагнитным слоем обычно вводился тонкий слой MgO или AlO_x , который предотвращает искажение электронной и спиновой структуры Дираковского конуса топологических состояний, используемых для создания спиновых токов. Кроме того, известны работы, показывающие высокую эффективность спин-орбитального торк эффекта и передачи спинового момента именно при использовании контакта Pt и ферромагнитного материала (Co).

Общими с заявленными в научных публикациях устройствами является использование спин-орбитального торк эффекта для передачи спинового момента при записи информации в запоминающую ячейку. Отличительными признаками является использование графена с большим спин-орбитальным взаимодействием и уникальными транспортными характеристиками для генерации спиновых токов.

Наиболее близким техническим решением к заявленному устройству является техническое решение [6], описывающее магнитный записывающий элемент памяти, состоящий из набора слоев: центральный магнитный слой, размещенный между двумя внешними немагнитными слоями, причем оба внешних немагнитных слоя выполнены из различных материалов. В том же техническом решении предложена реализация ячейки магнитной памяти типа STT-MRAM с использованием предложенного магнитного записывающего элемента. В этом случае устройство будет состоять из элемента записи (центральный магнитный слой, размещенный между двумя внешними немагнитными слоями) на изолирующей подложке и размещенный над элементом записи - элемент считывания информации, состоящий из второго магнитного слоя и верхнего слоя, играющего роль верхнего электрода, который может состоять из одного или нескольких проводящих слоев (магнитных или немагнитных). Преимуществом такого изобретения является то, что запись и считывание информации происходят независимо, и эти процессы оптимизированы отдельно. Т.е. используется in-plane конфигурация ячейки магнитной памяти, когда ориентация намагниченности свободного и фиксированного слоев ориентирована в плоскости слоя.

Общими с заявленным устройством признаками является то, что в устройстве используется аналогичная последовательность слоев для записи и считывания информации в магнитной ячейке памяти. Также в описании изобретения указано, что в качестве нижнего немагнитного слоя под центральным магнитным слоем могут использоваться немагнитные металлы (Pt, Pd, Cu, Au, Bi, Ir, Ru, W,...), сплавы этих металлов, органические и неорганические полупроводниковые соединения (GaAs, Si, Ge), полупроводниковые соединения типа SiC или графен, размещенный при необходимости на подложках Ir, Ru, Ni. Материал графен действительно может быть успешно использован в качестве немагнитного слоя под центральным магнитным слоем в магнитном записывающем элементе. Благодаря уникальным транспортным характеристикам и физико-химическим свойствам графена возможно достичь увеличения быстродействия процесса записи и уменьшить энергопотребление элемента записи. Кроме того, благодаря аномально большому спин-орбитальному взаимодействию в графене, обнаруженному при контакте с некоторыми тяжелыми металлами (Au, Pt, Ir), увеличивается эффективность генерации спин-поляризованных токов в элементе записи, что также приводит к меньшему потреблению мощности и увеличению эффективности работы устройства.

Однако экспериментальные исследования показывают нарушение электронной структуры графена при контакте с указанными в прототипе подложками (Ru, Ni). Экспериментально показано, что при контакте графена с поверхностью Ni, Co, Re, Ru электронная структура, характерная для графена с линейной дисперсией π состояний графена (т.н. конус Дирака) в области точки К зоны Бриллюэна, не сохраняется [7-10]. В области уровня Ферми происходит нарушение линейного характера дисперсионной зависимости π состояний графена вследствие сильной гибридизации π состояний графена с электронными состояниями подложки. Это приводит к потере уникальных свойств графена и невозможности инжекции спин-поляризованных токов из графена и передаче спинового момента в свободный магнитный слой для записи информации. Поэтому контакт графена с поверхностью Ni, Co, Re, Ru не может напрямую быть использован в качестве базовой основы для магнитного записывающего элемента. Отсюда недостатком прототипа является невозможность построения реально работающего устройства на основе только прямого контакта графена с поверхностью Ni, Ru.

Использование Ir в качестве подложки для графена является более эффективным, так как при этом формируется квазисвободный графен с линейным Дираковским конусом электронных состояний. При этом контакт графена с Ir приводит к индуцированному спин-орбитальному взаимодействию в графене и спиновому расщеплению электронных состояний до 50 мэВ [11].

Отличительными признаками заявленного устройства является то, что в качестве немагнитного слоя под центральным магнитным слоем используется графен, синтезированный на поверхности подложки SiC, но с интеркалированными атомами Au между графеном и SiC подложкой. Интеркалированные атомы Au позволяют получить характерную электронную структуру квазисвободного графена с линейным конусом Дирака. Кроме того, экспериментально обнаружено аномально большое спин-орбитальное расщепление электронных состояний в графене величиной до 100-150 мэВ при контакте с атомами Au, что существенно превышает величину спинового расщепления электронных состояний в графене на Ig подложке.

Другим отличительным признаком является использование ультратонкой прослойки Pt между графеном и свободным магнитным слоем для эффективной передачи спинового момента и инжекции спин-поляризованных токов в свободный магнитный слой. Т.к. именно контакт ферромагнитного материала (Co) и Pt показывает высокую эффективность спин-орбитального торк эффекта и передачи спинового момента [12]. Поэтому в заявленном изобретении используется контакт Pt и ферромагнитного материала для повышения эффективности передачи спинового момента вследствие спин-орбитального торк эффекта. С другой стороны, ультратонкий слой Pt предотвратит разрушение Дираковского конуса электронных состояний при контакте графена с магнитным металлом свободного магнитного слоя.

Заявленное устройство состоит из графена на подложке карбида кремния (SiC), где между графеном и подложкой добавлен монослой атомов золота (Au), который приводит к спиновому расщеплению электронных состояний в графене в результате индуцированного спин-орбитального взаимодействия [7,13]. В результате спинового расщепления электронных состояний графена на уровне Ферми при пропускании электрического тока через систему графен/Au/SiC создается спин-поляризованный ток (спиновый ток) вдоль направления электрического тока со спиновой ориентацией перпендикулярной току. При приложении тока обратного направления спиновая ориентация меняется на противоположную. При этом подложка SiC не шунтирует спиновый ток в графене, что приводит к увеличению эффективности работы устройства и упрощает внедрение элемента в конструкцию устройства спинтроники. Данный спиновый ток посредством спин-орбитального торк эффекта может индуцировать намагниченность в свободном магнитном слое ячейки STT-MRAM, расположенном поверх системы графен /Au/SiC. При этом смена направления спинового тока будет приводить к переключению ориентации индуцированной намагниченности в свободном слое вследствие спин-орбитального торк эффекта. Между контактом графен/Au/SiC и свободным магнитным слоем размещен ультратонкий слой Pt, который, с одной стороны, предотвратит разрушение Дираковского конуса графеновых состояний при контакте с магнитным металлом свободного слоя. С другой стороны, система Co с тонким слоем Pt характеризуется наибольшей степенью эффективности спин-орбитального торк эффекта. Использование наноструктур Co/Pt для генерации в них индуцированной намагниченности при формировании спинового тока вдоль поверхности графена в системе графен/Au/SiC позволит увеличить эффективность работы. При использовании толщины свободного магнитного слоя (из ферромагнитного материала Co) от 10 до 100 Å ориентация намагниченности, которая будет индуцироваться вследствие спин-орбитального торк эффекта, будет в плоскости слоя. При использовании свободного магнитного слоя Co толщиной более 150 Å в системе будет индуцироваться намагниченность с ориентацией перпендикулярно слою. Таким образом, можно реализовать две конфигурации ячейки STT-MRAM: с ориентацией намагниченности свободного и фиксированного слоев вдоль слоя или перпендикулярно слою. При этом возможна работа устройства в двух режимах при пропускании электрического тока через графен/Au/SiC со знаком (+) и (-), что будет приводить к противоположному (реверсному) изменению ориентации намагниченности свободного слоя в ячейке магнитной памяти.

Микромагнитное моделирование подтвердило эффективность работы заявленного устройства. Для определения спинового тока, возникающего в заявленном устройстве, необходимо рассмотреть систему со спин-орбитальным взаимодействием, которая описывается гамильтонианом $H_{SO} = \varepsilon(k_x) - \frac{\alpha}{\hbar}(k_x \sigma_y - k_y \sigma_x)$, где $\varepsilon(k_x) = \hbar v k_x$ - это закон дисперсии для электронов в графене. В результате прикладывания электрического поля E_x в направлении, обозначенном на фиг. 1, вдоль направления x возникает спиновый ток

$$j_s^x = \frac{2\alpha}{\hbar v} j_e^x = \frac{2\alpha}{\hbar v} \sigma E_x, \quad (1)$$

где σ - проводимость в графене, α - постоянная Рашбы спин-орбитального взаимодействия ("α_F=100 мэВ для контакта графен/Au [7] и 80 мэВ для контакта графен/Pt [14] согласно экспериментальным результатам). Это приводит к спиновой аккумуляции, т.е. появлению нескомпенсированной спиновой плотности со спиновой поляризацией в направлении y

$$\langle \delta \vec{\sigma} \rangle_y^{VV} = -\alpha \frac{ne\tau}{\hbar \varepsilon_F} E_x, \quad (2)$$

где n - плотность электронов в графене, τ - время жизни. Согласно выражениям (1) и (2) переключение направления приложенного электрического поля будет приводить к переключению спинового тока и спиновой поляризации. Учитывая, что групповая скорость электронов на уровне Ферми составляет

$v=10^6$ м/с и, используя формулы (1) и (2), мы можем оценить отношение генерируемого спинового тока к пропускаемому электрическому току $|j_s|/|j_e|=0.015$. Используя значение проводимости в графене $\sigma \sim 2 \times 10^3$ S/cm, можно оценить электрический ток как $j_e^x \approx 2 \times 10^7 (\Delta U [mV] / \Delta X [nm])$ A/cm², где ΔU - напряжение в милливольтках. На основании этих оценок можно сделать вывод, что электрический и соответственно спиновый ток, возникающий на поверхности системы графен/Au, не меньше, чем в случае спинового тока, возникающего в Pt в результате спинового эффекта Холла. Таким образом, система графен/Au, характеризующаяся уникальной спиновой структурой, может быть эффективно использована для возбуждения спиновых токов с ориентацией спинов строго перпендикулярно импульсу движущегося электрона.

Спиновая аккумуляция на интерфейсе графен/Au, индуцированная эффектом Рашбы, может рассматриваться как эффективное внутреннее магнитное поле, которое способно намагнитить или перемагнитить свободный слой магнитной ячейки STT-MRAM. Это эффективное магнитное поле, индуцированное спиновым током в графене, приводит к обменному взаимодействию π состояний графена и локальных магнитных моментов свободного магнитного слоя, тем самым приводя к изменению намагниченности свободного слоя. Эффективное магнитное поле $\vec{B}_{SO}$ может быть представлено в следующем виде:

$$\vec{B}_{SO} = -\frac{\alpha k_F}{e v M_s} P j_e [\vec{z}^0 \times \vec{j}^0], \text{ where } j^0 = 1, P = \frac{J}{\varepsilon_F}. \quad (3)$$

Это дополнительное эффективное магнитное поле создает спин-торк эффект, действующий на намагниченность свободного слоя. При этом торк задается следующим выражением:

$$\vec{T}_{SO} = [\vec{M} \times \vec{B}_{SO}] = \frac{\alpha k_F}{e v M_s} P j_e [\vec{M} \times \vec{j}^0] = \frac{\alpha k_F}{e v} P j_e [\vec{M}^0 \times \vec{j}^0]. \quad (4)$$

Для демонстрации возможности эффективного перемагничивания была проведена серия микромагнитных моделирований с использованием экспериментально наблюдаемых величин спин-орбитального расщепления электронных состояний в графене. Для микромагнитного моделирования использовались следующие величины: $M_s=800$ emu/cm³, константа обменного взаимодействия $A=1.3 \times 10^{-6}$ erg/cm, коэффициент затухания $\alpha^*=0.01$ и константа анизотропии $K=0.5 \times 10^4$ erg/cm². Конкретные примеры реализации устройства и результаты микромагнитного моделирования будут описаны в соответствующем разделе.

Технический результат, достигаемый предлагаемым устройством, состоит в следующем:

а) Увеличение быстродействия устройства.

За счет использования квазисвободного графена, обладающего большой подвижностью носителей тока, высокой электропроводностью и большей длиной спиновой диффузии, чем у аналогов. А также за счет использования контакта магнитного слоя с Pt для переноса спинового момента. Контакт ферромагнетик - Pt обладает наибольшей степенью эффективности передачи спинового момента в элементе записи к свободному магнитному слою, т.е. обладает наибольшей эффективностью спин-орбитального торк эффекта.

б) Снижение энергозатрат при записи информации за счет уменьшения электрического тока, необходимого для записи информации.

За счет того, что для создания спиновых токов используется контакт графена с золотом, т.к. контакт графена с золотом приводит к спиновой поляризации электрического тока, пропускаемого через устройство, без приложенного внешнего магнитного поля. И за счет высокой проводимости графена потребуются меньший электрический ток для генерации спинового тока в графене и для передачи спинового момента от элемента записи к свободному магнитному слою.

Сущность заявленного устройства проиллюстрирована фиг. 1-4. Схема заявленного устройства представлена на фиг. 1, где 1 - магнитный слой, выполненный из ферромагнитного материала (Ni, Co, Fe или сплава из этих металлов) и толщиной от 1 до 10 нм, 2 - ультратонкий слой платины толщиной 1-2 монослоя (0,2-0,5 нм). Элементы устройства 1 и 2 выполнены в форме параллелепипеда и ограничены размерами ячейки запоминающего устройства, для которого будет использовать заявленное устройство записи. Слой 3 - монослой графена, слой 4 - монослой атомов металла, интеркалированный под графеновый монослой и 5 - изолирующая подложка, состоящая из материала карбида кремния. Набор слоев 3, 4, 5 представляет собой намагничивающий слой, где слои расположены эпитаксиально друг на друге и выполнены в виде параллелепипеда, по ширине ограниченного размерами слоя 1 и 2, т.е. размерами ячейки запоминающего устройства, и по длине превышающего размеры ячейки запоминающего устройства в 2-3 раза. Данная геометрия заявленного устройства записи позволяет разместить контакты на концах линии записи и пропускать электрический ток через намагничивающий слой, состоящий из слоев 3, 4 и 5. Направление градиента потенциала на концах линии записи, которое совпадает с направлением тока записи, обозначено буквой J. В результате спин-орбитального взаимодействия в графене (3) возникает спиновый ток, который вследствие спин-орбитального торк эффекта через ультратонкий слой платины (2) будет оказывать влияние на намагниченность свободного магнитного слоя (1). Путем изменения ориентации намагниченности свободного слоя (1) происходит запись информации в ячейку запоминающего

устройства.

Работа заявленного устройства осуществляется, как показано на фиг. 2. Ячейка запоминающего устройства будет располагаться непосредственно на заявленном устройстве записи. Кроме ранее обозначенных элементов устройства записи информации на фиг. 2 обозначены 6 - фиксированный магнитный слой (толщина 1-10 нм), выполненный из ферромагнитного материала (Ni, Co, Fe или сплава из этих металлов), направление намагниченности которого зафиксировано, 7 - туннельный барьер, выполненный из тонкого слоя диэлектрического материала (например, MgO, AlO_x) толщиной до 3 нм для эффективного считывания магниторезистивного туннельного сопротивления. Взаимная ориентация намагниченности фиксированного (6) и свободного (1) слоев будет приводить к изменению сопротивления туннельного перехода. Измеряя величину электрического сопротивления ячейки, можно считать записанную информацию.

На фиг. 3 и 4 продемонстрированы характеристики работы заявленного устройства для конкретных примеров реализации, описанных ниже. На фиг. 3 показаны рассчитанные петли намагничивания свободного магнитного слоя с заданными размерами и из различных магнитных материалов, т.е. обладающих различной величиной константы анизотропии. На фиг. 4 проведены сравнительные измерения для различных размеров свободного магнитного слоя. На фиг. 4 показано критическое эффективное поле, необходимое для перемагничивания свободного магнитного слоя в зависимости от его размеров для случаев магнитотвердого (сплошная линия) и магнитомягкого материалов (пунктирная линия). Как можно видеть на фиг. 4, даже в случае дополнительной анизотропии (для магнитотвердого материала - сплошная линия с точками на фигуре), критическое эффективное магнитное поле для перемагничивания составляет менее 90 Эрстед, что соответствует плотности тока 1.4×10^7 А/см². Данная величина тока может оказаться больше используемой в настоящее время для аналогичных устройств, однако потребляемая мощность заявленного устройства будет существенно меньше за счет большей проводимости графена.

Описание конкретных примеров реализации данного изобретения.

Заявленное устройство было апробировано в Санкт-Петербургском государственном университете (СПбГУ). Конкретные примеры реализации приведены ниже:

Пример 1.

Заявленное устройство на фиг. 1 с использованием свободного магнитного слоя из пермаллоя (магнитомягкий сплав Ni-Fe) и размерами свободного магнитного слоя и ультратонкого слоя платины $50 \times 50 \times 10$ нм³ (длина×ширина×высота). В качестве подложки используется карбид кремния (SiC), на поверхности которой методом CVD (крекинг углеродосодержащих газов) синтезирован монослой графена. Ширина графена на подложке SiC ограничена размерами свободного магнитного слоя, а длина превышает длину свободного магнитного слоя в 2-3 раза. И между монослоем графена и подложкой карбида кремния интеркалирован один монослой атомов металла золота (Au) с толщиной 0,235 нм, который приводит к спиновому расщеплению электронных состояний в графене до 100 мэВ в результате индуцированного спин-орбитального взаимодействия. В результате спинового расщепления электронных состояний графена на уровне Ферми при пропускании электрического тока через намагничивающий слой, состоящий из слоев графен/Au/SiC, создается спин-поляризованный ток (спиновый ток) вдоль направления электрического тока со спиновой ориентацией в плоскости слоя и перпендикулярно направлению тока. При приложении тока обратного направления спиновая ориентация меняется на противоположную. Данный спиновый ток посредством спин-орбитального торк эффекта индуцирует намагниченность в свободном магнитном слое, расположенном на системе графен/Au/SiC, через ультратонкий слой платины. При этом смена направления спинового тока будет приводить к переключению ориентации индуцированной намагниченности в свободном слое вследствие спин-орбитального торк эффекта. Между контактом графен/Au/SiC и свободным магнитным слоем размещен ультратонкий слой Pt (толщиной 1-2 монослоя или 0,226-0,452 нм), который с одной стороны предотвратит разрушение Дираковского конуса графеновых состояний при контакте с магнитным металлом свободного слоя. С другой стороны, система Со с тонким слоем Pt характеризуется наибольшей степенью эффективности спин-орбитального торк эффекта, что позволяет увеличить эффективность работы и увеличить быстродействие устройства.

В данном примере реализации устройства используется свободный магнитный слой из магнитомягкого материала (сплав Ni-Fe). В случае магнитомягкого материала ($K=0$ на фиг. 3) критическое эффективное магнитное поле для перемагничивания будет не более 20 Э, что соответствует плотности тока 0.4×10^7 А/см². Для создания такого эффективного поля достаточно приложить к намагничивающему слою графен/Au/SiC разность потенциалов 0,16 мВ/нм или температурный градиент 5,4 мК/нм. В то же время эффективное поле перемагничивания слегка увеличивается с увеличением размеров (длина, ширина) свободного слоя из магнитомягкого материала (фиг. 4). И наиболее оптимальными размерами для заявленного устройства со свободным слоем из магнитомягкого материала являются размеры $50 \times 50 \times 10$ нм³ (длина×ширина×высота).

Пример 2.

Заявленное устройство на фиг. 1 и описанное в примере 1, но в качестве свободного слоя используется магнитотвердый материал (CoFeB, FeB, CoFe и др., константа анизотропии $K \neq 0$). В этом случае

критическое эффективное магнитное поле, необходимое для перемагничивания будет 90 Э (соответствует плотности тока до $1.4 \times 10^7 \text{ А/см}^2$), как показано на фиг. 3. Таким образом, для данного примера реализации заявленного устройства потребуется большее эффективное магнитное поле для перемагничивания свободного слоя, а значит и большая величина напряжения, прикладываемая к намагничиваемому слою для создания спиновых токов в графене - разность потенциалов $0,72 \text{ мВт/нм}$ или температурный градиент $24,12 \text{ мК/нм}$. В то же время эффективное поле перемагничивания практически не зависит от размеров (длина, ширина) свободного слоя в случае использования магнитотвердого материала. Таким образом, могут использоваться и другие размеры (длина, ширина) свободного магнитного слоя.

Пример 3.

Заявленное устройство на фиг. 1 и описанное в примере 1, но между монослоем графена и подложкой карбида кремния интеркалирован монослой атомов платины (Pt) (толщина $0,226 \text{ нм}$). Контакт графена с платиной также приводит к спиновому расщеплению электронных состояний в графене (величина расщепления до 80 мэВ). При меньшей величине спинового расщепления электронных состояний графена преимуществом использования платины по сравнению с золотом является энергетическая локализация d-электронных состояний платины вблизи уровня Ферми, что повышает эффективность инжекции спиновых токов и спин-орбитального торк-эффекта.

Технико-экономическая эффективность заявленного устройства состоит в достижении технического результата. Заявленное устройство имеет коммерческую ценность и при доведении до промышленного производства может быть использовано в области вычислительной техники в качестве элемента записи информации в ячейках запоминающих устройств оперативной памяти с передачей спинового момента (STT-MRAM).

Как показали проведенные исследования (пример 1, пример 2), заявленное устройство не уступает по техническому результату современным разработкам таких мировых гигантов, как IBM и Samsung, которые активно занимаются разработкой новой памяти типа STT-MRAM, и в ближайшем будущем она может стать заменой флэш-памяти. Кроме того, данные производители уделяют особое внимание поиску новых материалов с уникальными характеристиками, что позволит улучшить характеристики разрабатываемой ячейки оперативной памяти. В заявленном устройстве предлагается использовать материал графен и монослои металлов, которые существенно повысят рабочие характеристики ячейки запоминающего устройства оперативной памяти типа STT-MRAM, увеличат ее быстродействие и уменьшат энергозатраты при работе устройства. Таким образом, заявленное устройство может стать основой импортозамещения при производстве элементов записи информации в ячейках запоминающих устройств оперативной памяти.

В настоящее время компания "Крокус НаноЭлектроника" совместно с МФТИ (Московский физико-технический институт) проводят исследования по разработке нового типа памяти STT-MRAM. Заявленное устройство может повысить конкурентоспособность данной продукции российского производства благодаря использованию новых материалов с уникальными свойствами.

Кроме того, программа развития Цифровой экономики, включенная в перечень основных направлений стратегического развития России до 2025 года, нацелена на развитие "сквозных технологий", к которым относятся работы по созданию квантовых компьютеров и искусственного интеллекта. Заявленное устройство напрямую относится к элементам, необходимым к использованию в перспективных квантовых компьютерах, что способствует скорейшему развитию и внедрению суперкомпьютеров в России.

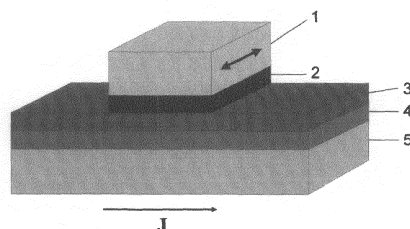
Список использованных источников информации.

1. Патент США US 8513749, 20.08.2013.
2. Патент США US 9166146 B2, 20.10.2015.
3. Патент США US 8889433, 18.11.2014.
4. A. Mellnik et al., Nature 511, 449 (2014).
5. I.M. Miron et al., Nature 476, 189 (2011).
6. Патент США US 2012/0098077 A1, 26.04.2012 (прототип).
7. A.M. Shikin et al., New Journal of Physics 15, 013016 (2013).
8. O. Rader et al., Phys. Rev. Lett. 102, 057602 (2009).
9. M. Papagno et al., Phys. Rev. B 88, 235430 (2013).
10. T. Brugger et al., Phys. Rev. B 79, 045407 (2009).
11. Marchenko et al., Phys. Rev. B 87, 115426 (2013).
12. C.-J. Lin et al., Journal of Magnetism and Magnetic Materials 93, 194-206 (1991).
13. D. Marchenko et al., Appl. Phys. Lett. 108, 172405 (2016).
14. I.I. Klimovskikh et al., Phys. Rev. B 90, 235431 (2014).

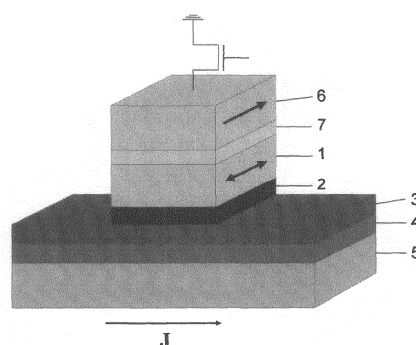
ФОРМУЛА ИЗОБРЕТЕНИЯ

Устройство записи информации для магниторезистивной оперативной памяти, включающее магнитный слой с намагниченностью в его плоскости, который выполнен в форме параллелепипеда и соединен с немагнитным слоем, выполненным в виде параллелепипеда, ширина которого соизмерима с шири-

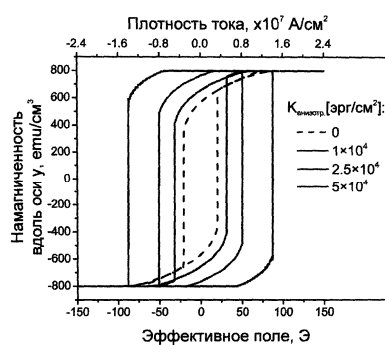
ной магнитного слоя, а его длина в 2-3 раза больше длины магнитного слоя, и изолирующую подложку, на которой расположен немагнитный слой, отличающееся тем, что между магнитным слоем и немагнитным слоями расположен ультратонкий слой платины толщиной 0,2-0,5 нм, соизмеримый по форме и размерам с магнитным слоем, немагнитный слой выполнен из двух слоев, один из которых выполнен из графена и расположен в контакте с ультратонким слоем платины, а второй выполнен из монослоя золота и расположен между слоем, выполненным из графена, и изолирующей подложкой.



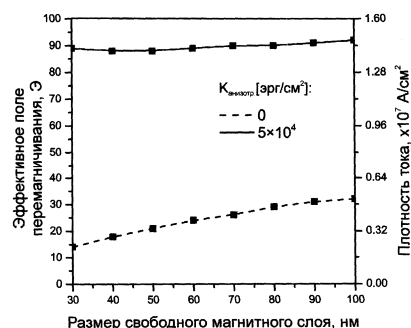
Фиг. 1



Фиг. 2



Фиг. 3



Фиг. 4



Евразийская патентная организация, ЕАПВ

Россия, 109012, Москва, Малый Черкасский пер., 2