# POCCINICKASI DELLEPALLINSI



路路路路路路

路

密

密

松

松

盘

岛

路

怒

密

盘

密

密

路

密

路

松

松

路

路

密

路

路

密

路路

路路

路路

松

路

路

密

密

路

岛

松

密

松

路

路

路

盎

на полезную модель

№ 170009

# СПИНОВЫЙ ТРАНЗИСТОР

Патентообладатель: федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования "Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики" (Университет ИТМО) (RU)

Авторы: **Шелых Иван Андреевич (RU), Иорш Иван Владимирович (RU), Шеремет Александра Сергеевна (RU)** 

Заявка № 2016140439

Приоритет полезной модели 13 октября 2016 г. Дата государственной регистрации в Государственном реестре полезных моделей Российской Федерации 11 апреля 2017 г. Срок действия исключительного права на полезную модель истекает 13 октября 2026 г.

Руководитель Федеральной службы по интеллектуальной собственности

Fellesse

Г.П. Ивлиев



路路路路路

密

密

怒

怒

密

盘

路

岛

路

路

岛

松

密

母

路

密

路

路

路

路

松

路

路

岛

岛

路

盘

松

盎

密

松

密

松

岛

岛

密

密

岛



(51) MIIK H01L 25/11 (2006.01)

#### ФЕДЕРАЛЬНАЯ СЛУЖБА ПО ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ СОБСТВЕННОСТИ

## (12) ОПИСАНИЕ ПОЛЕЗНОЙ МОДЕЛИ К ПАТЕНТУ

(21)(22) Заявка: 2016140439, 13.10.2016

(24) Дата начала отсчета срока действия патента: 13.10.2016

Дата регистрации: 11.04.2017

Приоритет(ы):

(22) Дата подачи заявки: 13.10.2016

(45) Опубликовано: 11.04.2017 Бюл. № 11

Адрес для переписки:

197101, Санкт-Петербург, Кронверкский пр., 49, Университет ИТМО, ОИС и НТИ

(72) Автор(ы):

Шелых Иван Андреевич (RU), Иорш Иван Владимирович (RU), Шеремет Александра Сергеевна (RU)

(73) Патентообладатель(и):

федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования "Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики" (Университет ИТМО) (RU)

(56) Список документов, цитированных в отчете о поиске: RU 2387047 C1, 20.04.2010. RU 81598 U1, 20.03.2009. US 5432373 A, 11.07.1995. US 5565695 A, 15.10.1996. US 20110248325 A1, 13.10.2011.

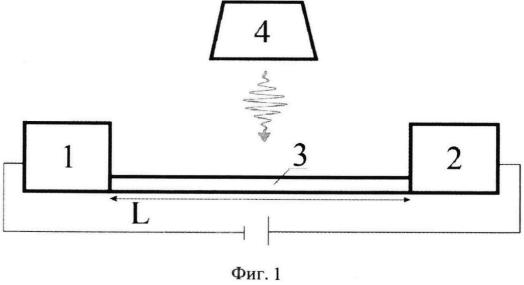
#### (54) СПИНОВЫЙ ТРАНЗИСТОР

(57) Реферат:

Использование: для создания оптически управляемых спиновых логических элементов. Сущность полезной модели заключается в том, что спиновый транзистор содержит эмиттер и коллектор, которые выполнены ферромагнитного материала, базу в виде тонкого слоя полупроводника нецентросимметричного класса и источник управляющего

выполненный виде источника электромагнитного излучения с плотностью мощности от  $1 \div 10$  Вт/см<sup>2</sup> и длиной волны излучения от 1 до 100 микрон. Технический результат: обеспечение возможности увеличения эффективности управления спиновым током транзистора. 1 з.п. ф-лы, 2 ил.

ത



~

Полезная модель относится к области спинтроники, в частности к спиновым транзисторам, и может быть использована для создания оптически управляемых спиновых логических элементов.

Из уровня техники известен спиновый транзистор, представляющий собой слоистую структуру из слоя ферромагнетика, изолятора и широкозонного полупроводника [Патент РФ №2387047, МПК Н01L 29/82, дата приоритета 23.09.2008, опубликовано 20.04.2010]. В данном устройстве инжектор спинов представляет собой ферромагнетик (Fe, допированный Eu), а приемник спинов представляет собой широкозонный полупроводник (GaAs). Выходные характеристики устройства управляются внешним магнитным полем за счет изменения спиновой поляризации носителей, инжектируемых из ферромагнитного эмиттера. Недостатком данного решения является необходимость использования относительно высоких магнитных полей (десятые доли Тесла) для управления выходными характеристиками транзистора.

Наиболее близким аналогом является спиновый транзистор Датта-Даса [Патент США №5654566, МПК Н01L 29/66, дата приоритета 21.04.1995, опубликовано 05.08.1997] с базой, представляющей собой тонкий полупроводниковый слой нецентросимметричного материала, заключенной между двумя ферромагнитными обкладками, представляющими собой эмиттер и коллектор. Ферромагнитные обкладки необходимы для генерации и приема спин-поляризованного электрического тока. Коэффициент прохождения спин-поляризованного тока через базу определяется, в частности, силой спин-орбитального взаимодействия. Таким образом, путем изменения спин-орбитального взаимодействия можно управлять прохождением спин-поляризованного тока через устройство. Сила спин-орбитального взаимодействия изменяется приложением постоянного электрического поля, перпендикулярного плоскости структуры. Для этих целей к двумерному электронному газу подводится электрический контакт (затвор). Таким образом, управление спин-поляризованным током происходит посредством изменения электрического напряжения на затворе. Недостатком известного технического решения является ограничение по скорости

Решается задача увеличения эффективности управления спиновым током.

выключения ограничено единицами наносекунд.

40

включения и выключения затворного напряжения. В частности, время включения и

Технический результат достигается тем, что предлагаемый спиновый транзистор содержит эмиттер и коллектор, которые выполнены из ферромагнитного материала, базу в виде тонкого слоя полупроводника нецентросимметричного класса и источник управляющего поля, выполненный в виде источника электромагнитного излучения с плотностью мощности от  $1 \div 10 \text{ Br/cm}^2$  и длиной волны излучения от 1 до 100 микрон. В качестве ферромагнитного материала используется железно-иттриевый гранат, а база выполнена из дихалкогенида переходного металла  $MoS_2$ .

Сущность предлагаемой полезной модели поясняется рисунками, где на фиг. 1 представлено схематическое изображение спинового транзистора; на фиг. 2 представлена зависимость кондактанса системы от интенсивности облучения.

Устройство состоит из ферромагнитной пластины с функцией эмиттера 1 и идентичной ей ферромагнитной пластины с функцией коллектора 2, с контактами, к которым прикладывается напряжение питания. Эмиттер 1 и коллектор 2 соединены посредством тонкого полупроводникового слоя с функцией базы 3. Над базой 3 расположен управляющий элемент 4, выполненный в виде источника электромагнитного поля.

Работа спинового транзистора осуществляется следующим образом. При подаче

напряжения питания в эмиттере 1 возникает спин-поляризованный ток электронов. Далее электроны инжектируются в тонкий полупроводниковый слой 3. В двумерном полупроводнике вектора спина электронов начинает вращаться относительно оси, сонаправленной с направлением движения электрона. Скорость вращения вектора спина пропорциональна величине спин-орбитального взаимодействия. Спинорбитальное взаимодействие определяется двумя механизмами: механизмом Рашбы и Дрессельхауза. Причиной обоих механизмов является возникновение эффективного магнитного поля при движении электрона, которое и взаимодействует со спином электрона. Взаимодействие Дрессельхауза присутствует в объемных и низкоразмерных полупроводниковых кристаллах, в которых отсутствует центр инверсии (нецентросимметричных кристаллах). Взаимодействие Рашбы присутствует только в низкоразмерных полупроводниковых структурах, в которых толщина структуры хотя бы в одном направлении сравнима с волной Де Бройля электрона в материале. Сила спин-орбитального взаимодействия Рашбы и Дрессельхауза определяется константами а и в соответственно. При достижении электроном коллектора 3 он частично отражается от него, а частично проходит, формируя интегральный ток в цепи. Коэффициент пропускания электрона на границе базы 3 и коллектора 2 зависит от угла между направлением намагниченности в коллекторе 2 (таким же, как в эмиттере 1) и направлением спина электрона: если два направления совпадают, то пропускание максимально и через схему течет ток, если же намагниченность и спин противонаправлены, то пропускание минимально, и ток через систему не течет. Направление спина электрона на границе с коллектором 2 определяется временем пролета электронов от эмиттера 1 до коллектора 2 и скоростью вращения вектора спина. Таким образом, током через систему можно управлять, изменяя скорость вращения вектора спина, то есть меняя величину спин-орбитального взаимодействия. Изменение величины спин-орбитального взаимодействия обеспечивается посредством управляющего элемента 4, представляющего собой источник сильного электромагнитного поля, например лазер. Возможность изменения констант спинорбитального взаимодействия внешним электромагнитным полем была показана в [Phys. Rev. Lett. 99, 047401 2007]. Изменение скорости вращения проекции спина под действием электромагнитного поля достигается вследствие эффекта «одевания» электронов полем, при котором происходит перенормировка констант спинорбитального взаимодействия. Согласно проведенным оценкам константы спинорбитального взаимодействия перенормируются таким образом, что константы спинорбитального взаимодействия убывают с интенсивностью управляющего поля. Таким образом, изменяя интенсивность управляющего электромагнитного поля, можно включать или выключать спин-поляризованный ток через систему. Отличием предлагаемой схемы от прототипа является использование в качестве управляющего элемента не затвора, создающего постоянное электрическое поле, а источника электромагнитного поля, что позволяет увеличить скорость включения и выключения транзистора, обеспечивая технический результат. В частности, время, за которое происходит перенормировка значений спин-орбитального взаимодействия и которое определяет время переключения транзистора, составляет 10 спектральных периодов одевающего поля и, следовательно, ограничено сверху значением 1 пикосекунда. Моделирование изменения кондактанса системы, результаты которого представлены на фиг. 2, проводилось для случая его выполнения на базе эмиттера 1 и коллектора 2, выполненных из железно-иттриевого граната, соединенных базой 3, выполненной из

тонкого слоя нецентросимметричного полупроводника с длиной L=2.3 мкм.

Управляющим элементом является источник электромагнитного поля с длиной волны 300 мкм.

На фиг. 2 представлены результаты численного моделирования кондактанса системы в зависимости от интенсивности электромагнитного поля. В моделировании константа спин-орбитального взаимодействия Дрессельхауза в была выбрана равной 20000 м/с, что соответствует среднему значению этой величины в полупроводниках GaAs, InSb, а также в двумерных материалах MoS<sub>2</sub>, WSe<sub>2</sub>. Моделирование проводилось при разных значениях константы  $\alpha$ , а именно при  $\alpha = \beta/4$ ,  $\alpha = \beta/2$ ,  $\alpha = 3\beta/4$ , что соответствует разным конкретным реализациям базы 3. При высоком кондактансе системы устройство находится в состоянии «включено», то есть при подаче напряжения, по устройству течет ток. При равенстве кондактанса нулю устройство находится в состоянии «выключено», то есть ток по системе не идет при подаче напряжения. Важной характеристикой устройства является минимальное значение интенсивности управляющего электромагнитного поля, переводящего устройство из состояния «включено» в состояние «выключено», называемое далее интенсивностью переключения. На фиг. 2 видно, что оптимальными с точки зрения минимизации интенсивности переключения являются полупроводниковые каналы, в которых α=β/4. Такие соотношения достигаются в двумерных полупроводниковых материалах MoS<sub>2</sub>, а также в полупроводниковых растворах InGaAs. При соотношении α=β/4 интенсивность переключения составляет 3 Bт/см<sup>2</sup>, что вполне достижимо в современных источниках электромагнитного излучения, таких как лазеры, и значительно ниже порога термического разрушения полупроводниковых слоев. Длина волны электромагнитного поля должна удовлетворять условию сильной связи, заключающемуся в том, что за время пролета электрона от истока до стока он должен испытать несколько осцилляций поля. Математически это условие может быть записано как  $\lambda < c\tau$ , где  $\lambda$  - длина волны электромагнитного поля, а т - время пролета электрона между истоком и стоком. Таким образом, для микронных размеров канала длина волны ограничена сверху величиной примерно 3 мм. При этом энергия фотона на спектральной частоте поля, должна быть меньше, чем энергии межзонных и межподзонных переходов в базе. Для случая тонких полупроводниковых материалов  $A^3B^5$  это ограничение приводит к минимальной длине волны порядка 30 мкм. Для двумерных каналов на основе дихалкогенидов переходных металлов, в которых отсутствуют межподзонные переходы, максимальная частота должна быть меньше запрещенной зоны, что соответствует длине волны 2 мкм.

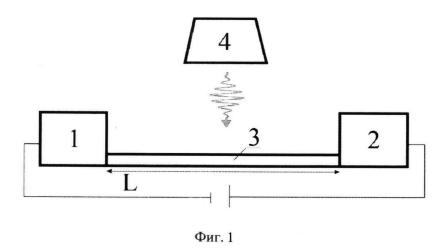
Таким образом, решается задача увеличения эффективности управления спиновым током заявляемого транзистора.

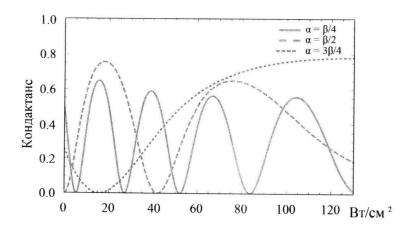
35

### (57) Формула полезной модели

- 1. Спиновый транзистор, содержащий эмиттер и коллектор, выполненные из ферромагнитного материала, базу в виде тонкого слоя полупроводника нецентросимметричного класса и источника управляющего поля, отличающийся тем, что источник управляющего поля выполнен в виде источника электромагнитного излучения с плотностью мощности от 1÷10 Вт/см<sup>2</sup> и длиной волны излучения от 1 до 100 микрон.
- 2. Спиновый транзистор по п. 1, отличающийся тем, что в качестве ферромагнитного материала используется железно-иттриевый гранат, а база выполнена из дихалкогенида переходного металла  $MoS_2$ .

# Спиновый транзистор





Фиг. 2