



ФЕДЕРАЛЬНАЯ СЛУЖБА  
ПО ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ СОБСТВЕННОСТИ,  
ПАТЕНТАМ И ТОВАРНЫМ ЗНАКАМ

(12) ОПИСАНИЕ ИЗОБРЕТЕНИЯ К ПАТЕНТУ

(21), (22) Заявка: 2009116572/28, 29.04.2009

(24) Дата начала отсчета срока действия патента:  
29.04.2009

(45) Опубликовано: 20.06.2010 Бюл. № 17

(56) Список документов, цитированных в отчете о поиске: A. Barthelemy, A. Fert, J-P. Contour, et. al. *Magnetoresistance and spin electronics. J. Magn. Magn. Mater.*, v.242-245, pp.68-76 (2002). RU 2342748 С1, 27.12.2008. RU 2175797 С1, 10.11.2001. RU 2120142 С1, 10.10.1998. EP 1949466 A1, 30.07.2008. US 2003142562 A1, 31.07.2003.

Адрес для переписки:  
660036, г.Красноярск, Академгородок, 50,  
стр.38, Институт физики СО РАН, патентный  
отдел

(72) Автор(ы):

Волков Никита Валентинович (RU),  
Еремин Евгений Владимирович (RU),  
Патрин Геннадий Семенович (RU),  
Ким Петр Дементьевич (RU)

(73) Патентообладатель(и):

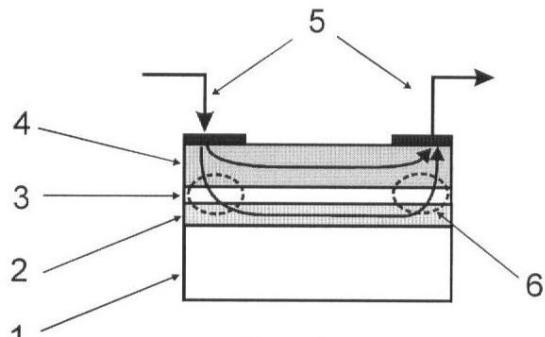
Институт физики им. Л.В. Киренского  
Сибирского отделения Российской академии  
наук (RU)

(54) ТУННЕЛЬНЫЙ МАГНИТОРЕЗИСТИВНЫЙ ЭЛЕМЕНТ

(57) Реферат:

Туннельный магниторезистивный элемент относится к микроэлектронике, а именно к элементной базе спинtronики - новой области развития современной электроники, поскольку в его работе используются механизмы спин-зависимого электронного транспорта, и может быть использован при создании принципиально новых элементов, предназначенных для хранения, обработки и передачи информации. В туннельном магниторезистивном элементе, содержащем подложку с двумя ферромагнитными проводящими слоями, разделенными тонким слоем диэлектрика, токовые контакты крепятся к верхнему ферромагнитному слою структуры, который имеет проводимость, меньшую, чем проводимости нижнего слоя, а магниторезистивный эффект реализуется за счет переключения токового канала между слоями с различной проводимостью, управляемого воздействием магнитного поля

на магнитные туннельные переходы под токовыми контактами. Изобретение обеспечивает реализацию большой величины магниторезистивного (МР) эффекта в туннельной структуре при использовании СЕР (current in plane) геометрии, когда ток параллелен плоскости интерфейсов слоистой структуры и в возможность эффективного управления величиной МР эффекта током смещения, протекающим через структуру. 5 ил.



Фиг. 1

R U 2 3 9 2 6 9 7 C 1

1 C 1  
9 2 6 9 7  
R U



FEDERAL SERVICE  
FOR INTELLECTUAL PROPERTY,  
PATENTS AND TRADEMARKS

(12) ABSTRACT OF INVENTION

(21), (22) Application: 2009116572/28, 29.04.2009

(24) Effective date for property rights:  
29.04.2009

(45) Date of publication: 20.06.2010 Bull. 17

Mail address:  
660036, g.Krasnojarsk, Akademgorodok, 50, str.38,  
Institut fiziki SO RAN, patentnyj otdel

(72) Inventor(s):

Volkov Nikita Valentinovich (RU),  
Eremin Evgenij Vladimirovich (RU),  
Patrin Gennadij Semenovich (RU),  
Kim Petr Dement'evich (RU)

(73) Proprietor(s):

Institut fiziki im. L.V. Kirenskogo Sibirskogo  
otdelenija Rossijskoj akademii nauk (RU)

(54) TUNNEL MAGNETORESISTIVE ELEMENT

(57) Abstract:

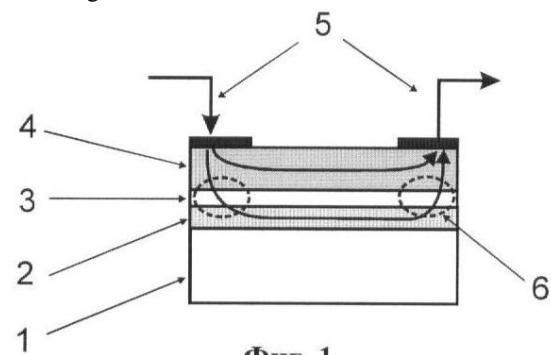
FIELD: physics, semiconductors.

SUBSTANCE: tunnel magnetoresistive element relates to microelectronics and specifically to spintronic hardware components - a new area in development of modern electronics, since its operation employs a spin-dependant electron transport mechanism and can be used in making conceptually new elements designed for storing, processing and transmitting information. In the tunnel magnetoresistive element which has a substrate with two ferromagnetic conducting layers separated by a thin dielectric layer, current contacts are attached to the top ferromagnetic layer of the structure whose conductivity is less than conductivity of the bottom layer and the magnetoresistive effect is realised by switching the current channel between layers with different conductivity controlled by effect of the magnetic field on magnetic tunnel junctions under the current

contacts.

EFFECT: invention enables realisation of a large amount of magnetoresistive (MR) effect in a tunnel structure using current in plane (CEP) geometry when current is parallel the plane of interfaces of the layered structure and possibility of efficiently controlling the value of MR effect using bias current flowing through the current.

5 dwg, 1 ex



Фиг. 1

R U 2 3 9 2 6 9 7 C 1

R U 2 3 9 2 6 9 7 C 1

Изобретение относится к микроэлектронике, а именно к элементной базе спинtronики - новой области развития современной электроники, поскольку в его работе используются механизмы спин-зависимого электронного транспорта. И может быть использовано при создании принципиально новых элементов, предназначенных для хранения, обработки и передачи информации.

Известно, что для создания магниторезистивных (МР) устройств используют материалы мanganитов с эффектом колоссального магнитосопротивления [Э.Л. Нагаев. Мanganиты лантана и другие магнитные полупроводники. УФН, Т.166, 10 В.8, С.833-853 (1996)]. Величина магнитосопротивления  $MR = (R(H) - R(0))/R(0)$  в них может достигать больших значений.

Но с практической точки зрения они оказались малопригодны из-за больших величин магнитного поля  $H$ , в которых достигаются приемлемые для практических 15 приложений величины магниторезистивного эффекта, и сильной зависимости эффекта от температуры.

Наиболее близким к заявляемому изобретению является МР элемент на основе многослойныхnanoструктур с ферромагнитными (ФМ) слоями, в основе работы 20 которого лежат механизмы спин-зависимого электронного транспорта [A. Barthelemy, A. Fert, J-P. Contour, et al. Magnetoresistance and spin electronics. J. Magn. Magn. Mater., v.242-245, pp.68-76 (2002)]. Структуры типа ФМ металл/нормальный металл/ФМ металл (FM/N/FM структуры) обладают эффектом гигантского магнитосопротивления - зависимостью сопротивления структуры от взаимной 25 ориентации намагниченостей магнитных слоев структуры. Указанные структуры уже нашли свое применение в качестве магниторезистивных считающих головок для дисков магнитной памяти.

Большие величины МР эффекта, что необходимо для многих практических 30 приложений, можно реализовать в магнитных туннельных структурах типа ФМ металл/диэлектрик/ФМ металл (FM/I/FM структуры). Такие структуры рассматриваются как перспективные элементы для реализации оперативной магнитной памяти, всевозможных магниточувствительных датчиков, магнитоуправляемых детекторов СВЧ-излучения [Springer Series in Surface Science: Giant Magnetoresistance Device / Ed. Hirota E., Springer, 2002. - 177 p.; A.A. Tulapurkar, 35 Y. Suzuki, A. Fukushima, H. Kubota, H. Maehara, K. Tsunekawa, D.D. Djayaprawira, N. Watanabe & S. Yuasa, Spin-torque diode effect in magnetic tunnel junctions. Nature (London) v.438, N 17, p.339-342 (2005)]. Ток в МР элементах на основе туннельных структур пропускается 40 перпендикулярно интерфейсам слоев, CPP (current perpendicular to the plane) геометрия, магнитное поле прикладывается в плоскости структуры. В основе работы МР элемента на основе магнитной туннельной структуры лежит механизм спин- 45 зависимого туннелирования между двумя ферромагнитными слоями с металлической проводимостью через потенциальный барьер (тонкий слой диэлектрика). В ФМ металлах носители заряда оказываются поляризованными по спину - из-за обменного расщепления число носителей со спином «вверх» (вдоль направления 50 намагниченности материала) и спином «вниз» (антипараллельно намагниченности) различается. Это приводит к тому, что сопротивление туннельного перехода  $R_T$  зависит от взаимной ориентации намагниченостей  $M_1$  и  $M_2$  ФМ слоев

$$50 \quad MR = R_{\uparrow\uparrow} + \frac{\Delta R}{2} (1 - \hat{s}_1 \cdot \hat{s}_2), \quad (1)$$

здесь  $\hat{s}_1$  и  $\hat{s}_2$  - единичные векторы вдоль намагниченостей первого и второго ферромагнитных слоев,  $M_1$  и  $M_2$ ,  $\Delta R = R_{\uparrow\downarrow} - R_{\uparrow\uparrow}$  - изменение сопротивления при

изменении состояния с антипараллельного расположения  $M_1$  и  $M_2$  на параллельное. Если коэрцитивные поля ФМ электродов различны, то взаимной ориентацией и, следовательно, сопротивлением  $R_T$  можно эффективно управлять с помощью внешнего магнитного поля, т.е. реализуется магниторезистивный эффект. Для 5 туннельного перехода CoFeB/MgO/CoFeB получены величины магнитосопротивления при комнатной температуре, достигающие 500% в магнитных полях, не превышающих несколько эрстед [Shinji Yuasa Giant Tunneling Magnetoresistance in MgO-Based Magnetic Tunnel Junctions. Journal of the Physical Society of Japan, v.77, N3, 0313001 10 (13 р.)]. Величина и знак туннельного магнитосопротивления определяется особенностями функции плотности состояний вблизи уровня Ферми ФМ электродов. Различаются два типа ФМ металлов: MASC ферромагнетики, у которых носители заряда преимущественно имеют спины, параллельные намагниченности; и MISF 15 ферромагнетики, носители заряда у которых ориентированы антипараллельно намагниченности. Если у туннельной структуры ферромагнитные слои одинакового типа, туннельное сопротивление минимально при параллельной ориентации намагниченостей электродов. Напротив, если при изготовлении структуры используются разные типы ферромагнетиков, то сопротивление минимально при 20 антипараллельной ориентации намагниченостей.

К недостаткам МР элементов на основе туннельного магнитосопротивления следует отнести:

- 1) быстрое подавление МР эффекта при увеличении напряжения смещения на структуре [J.S.Moodera, J.Nowak and R.J.M. van Veedonk. Interface Magnetism and Spin 25 Wave Scattering in Ferromagnet-Insulator-Ferromagnet Tunnel Junctions. Phys. Rev. Lett. v.80, p.2941-2944 (1998)];
- 2) CPP геометрия, при которой ток перпендикулярен плоскости интерфейсов структуры, что не всегда удобно для практических приложений, например, при 30 разработке гибридных структур ФМ/полупроводник, совместимых с традиционной планарной полупроводниковой технологией.

Технический результат предлагаемого изобретения заключается в реализации большой величины МР эффекта в туннельной структуре при использовании СИР (current in plane) геометрии, когда ток параллелен плоскости интерфейсов слоистой структуры и в возможности эффективного управления величиной МР эффекта током 35 смещения, протекающим через структуру.

Указанный технический результат достигается тем, что в туннельном магниторезистивном элементе, содержащем подложку с двумя ферромагнитными 40 проводящими слоями, разделенными тонким слоем диэлектрика, новым является то, что токовые контакты крепятся к верхнему ферромагнитному слою структуры, который имеет проводимость, меньшую, чем проводимости нижнего слоя, а магниторезистивный эффект реализуется за счет переключения токового канала 45 между слоями с различной проводимостью, управляемого воздействием магнитного поля на магнитные туннельные переходы под токовыми контактами.

В СИР геометрии, в отличие от прототипа, в котором используется CPP геометрия, токовые контакты крепятся к верхнему слою туннельной структуры - ФМ пленке с проводимостью, меньшей, чем у нижнего ФМ слоя структуры; при низких величинах 50 тока напряжение смещения на туннельных переходах между ФМ проводящими слоями под токовыми контактами мало, сопротивление туннельных переходов велико и ток течет по верхнему слою структуры; увеличение тока влечет за собой увеличение напряжения смещения на туннельных переходах, в результате их сопротивление

становится меньше сопротивления верхнего слоя, и происходит переключение токового канала из верхнего слоя структуры в нижний с низким сопротивлением; внешнее магнитное поле, как и в случае прототипа, изменяет сопротивление туннельных переходов, управляя тем самым процессом переключения токовых каналов; с учетом разницы в транспортных характеристиках слоев, переключение токовых каналов, вызванное изменением магнитного поля, приводит к МР эффекту, величина которого зависит от величины тока через структуру.

Сопоставительный анализ с прототипом показывает, что в заявляемом устройстве 10 используется туннельная структура в СИР геометрии, а МР эффект реализуется за счет переключения магнитным полем токовых каналов между ФМ слоями туннельной структуры с различными транспортными характеристиками, а туннельные магнитные Переходы под токовыми контактами играют роль элементов, управляющих 15 процессом переключения токовых каналов. Таким образом, заявляемое устройство соответствует критерию изобретения «новизна». При изучении других известных 20 технических решений в данной области техники признаки, отличающие заявляемое изобретение от прототипа, не были выявлены, и потому они обеспечивают заявлению техническому решению соответствие критерию «изобретательский уровень».

На фиг.1 приведен пример конструкции предлагаемого туннельного МР элемента: 1 - подложка; 2 - ферромагнетик с металлической проводимостью; 3 - слой диэлектрика; 4 - ферромагнетик с проводимостью, меньшей, чем у ферромагнетика 2; 5 - токовые контакты; 6 - область туннельного перехода для тока, текущего через 25 структуру; стрелками показаны токовые пути. На фиг.2 показана типичная ВАХ структуры: 7 - ВАХ верхнего слоя структуры; 8 - ВАХ туннельного перехода; 9 - результирующая ВАХ структуры; 10 - величина тока  $I_{th}$ , при которой сопротивление верхнего слоя структуры становится больше сопротивления нижнего слоя; на вставке 30 к фиг.2 приведена эквивалентная электрическая схема структуры;  $R_1$  - сопротивление верхнего слоя в структуре;  $R_2$  - сопротивление нижнего слоя;  $R_T$  - сопротивление туннельного перехода между слоями;  $I_M$  - ток по верхнему слою структуры;  $I_T$  - ток 35 через туннельные переходы в структуре. На фиг.3 дана схематичная иллюстрация переключения токовых каналов при изменении тока  $I$  через структуру и магнитного поля  $H$  (черные стрелки - токовые пути; белые стрелки - намагниченности слоев): показаны при режима работы структуры: а)  $I < I_{th}$ ,  $H=0$ , намагниченности слоев антипараллельны; б)  $I > I_{th}$ ,  $H=0$ , намагниченности слоев антипараллельны; в)  $I > I_{th}$ , в магнитном поле  $H$  намагниченности слоев ориентированы параллельно. Фиг.4 40 показывает типичную ВАХ структуры без магнитного поля ( $H=0$ ) и в магнитном поле ( $H$ ), и соответствующее поведение магнитосопротивления; кружками помечены участки ВАХ, соответствующие различным режимам работы структуры (см. фиг.3). На фиг.5 ВАХ практически реализованной структуры  $La_{0.7}Sr_{0.3}MnO_3$ /обедненный слой мanganита/MnSi без магнитного поля (11) и в магнитном поле (12) и 45 соответствующее поведение магнитосопротивления при температуре  $T=5K$ . Отрицательное магнитосопротивление, независящее от тока, в области малых токов связано со свойствами мanganита и в предлагаемом устройстве не используется.

Устройство представляет собой трехслойную структуру. На подложку 50 последовательно наносятся: слой ФМ с металлическим типом проводимости; тонкий (несколько нм) слой диэлектрика; верхний слой с проводимостью, меньшей проводимости нижнего слоя, фиг.1. Два токовых контакта крепятся на верхнем слое структуры. Для определенности рассматриваем случай структуры со слоями,

изготовленными из различного типа ФМ (MASC и MISC ферромагнетиков). Тогда в отсутствие магнитного поля намагниченности верхнего  $M_1$  и нижнего  $M_2$  слоев антипараллельны, и сопротивление туннельного перехода меньше, чем при параллельной ориентации  $M_1$  и  $M_2$ . Для одинаковых типов ФМ слоев принципиально механизм реализации МР остается прежним, изменится только знак МР эффекта при воздействии магнитного поля.

Работает устройство следующим образом. При малых токах  $I$  через структуру, меньших некоторой величины  $I_{th}$ , сопротивление туннельных переходов под токовыми контактами  $R_T$  больше сопротивления верхнего слоя  $R_1$  и ток течет по верхнему слою структуры, имеющему линейную вольт-амперную характеристику (ВАХ), фиг.2. При увеличении  $I$  происходит увеличение напряжения смещения  $V_b$  на туннельных переходах под токовыми контактами ( $V_b \neq V$ ,  $V_b = V_b(I)$ ), что влечет за собой уменьшение  $R_T$ , типичная ВАХ туннельного перехода показана на фиг.2. При  $I$  больше  $I_{th}$ ,  $R_T$  становится меньше  $R_1$  и ток начинает течь преимущественно по нижнему слою, сопротивление которого  $R_2$  много меньше  $R_1$ . Результирующую ВАХ структуры (фиг.2), отражающую процесс переключения токовых контактов при  $I > I_{th}$ , можно представить, используя эквивалентную электрическую схему устройства (вставка на фиг.2). Описанный сценарий реализуется в отсутствие магнитного поля, когда  $M_1$  и  $M_2$  антипараллельны, и  $R_T$  в зависимости от поля имеет минимальное значение. Магнитное поле, приложенное в плоскости структуры стремится выстроить  $M_1$  и  $M_2$  параллельно  $R_T$  при увеличении поля растет, становится больше  $R_1$  и токовый канал переключается в верхний слой структуры с линейной ВАХ, что означает увеличение сопротивления структуры в целом при увеличении поля, т.е. реализуется эффект положительного магнитосопротивления с величиной магнитосопротивления, зависящей от величины тока через структуру, фиг.3 и 4.

Пример практически реализованной структуры соответствует фиг.1, где 1 - подложка  $\text{SiO}_2$ ; 2 - слой  $\text{MnSi}$ ; 3 - обедненный слой мanganита; 4 - пленка  $\text{La}_{0.7}\text{Sr}_{0.3}\text{MnO}_3$ . Такая структура  $\text{La}_{0.7}\text{Sr}_{0.3}\text{MnO}_3$ /обедненный слой мanganита/ $\text{MnSi}$  изготовлена методом лазерного напыления на подложке  $\text{SiO}_2$ . Обедненный слой мanganита играет роль потенциального барьера между слоями  $\text{La}_{0.7}\text{Sr}_{0.3}\text{MnO}_3$  и  $\text{MnSi}$  с полупроводниковой и металлической проводимостью соответственно. Оба проводящих слоя ниже 30 К находятся в ФМ состоянии, формируя тем самым магнитный туннельный переход. На фиг.5 приведена реальная ВАХ структуры в CIP геометрии и соответствующее поведение магнитосопротивления в зависимости от величины тока. Видно, что МР эффект имеет пороговый характер, наблюдается только при  $I > I_{th}$ , и зависит от величины тока.

В данном примере величина магнитосопротивления может превышать 300%, к тому же не наблюдается насыщение эффекта, что принципиально позволяет рассчитывать на получение еще больших величин магниторезистивного эффекта. Насыщение магниторезистивного эффекта имеет место уже в магнитных полях  $\sim 1$  кЭ. Подбором материалов слоев в структуре можно увеличить температуры, при которых наблюдается МР эффект, и уменьшить величины рабочих магнитных полей магниторезистивного элемента.

#### 50 Формула изобретения

Туннельный магниторезистивный элемент, содержащий подложку с двумя ферромагнитными проводящими слоями, разделенными тонким слоем диэлектрика, отличающийся тем, что токовые контакты крепятся к верхнему ферромагнитному

слою структуры, который имеет проводимость, меньшую, чем проводимости нижнего слоя, а магниторезистивный эффект реализуется за счет переключения токового канала между слоями с различной проводимостью, управляемого воздействием магнитного поля на магнитные туннельные переходы под токовыми контактами.

5

10

15

20

25

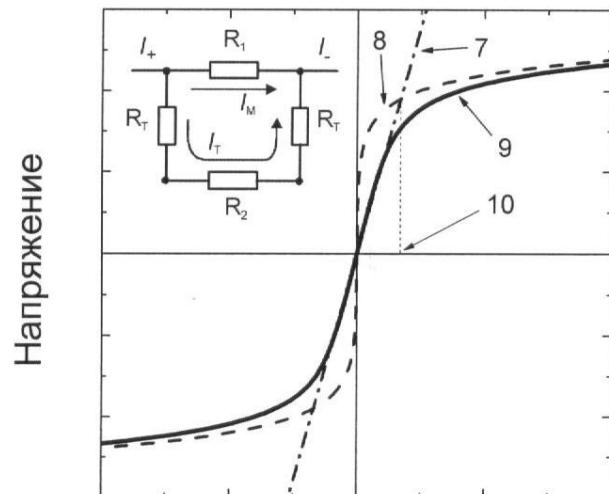
30

35

40

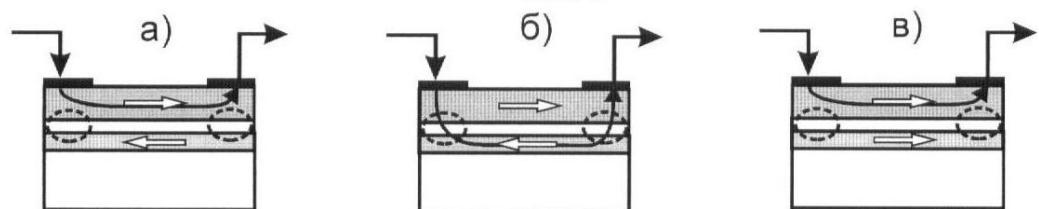
45

50

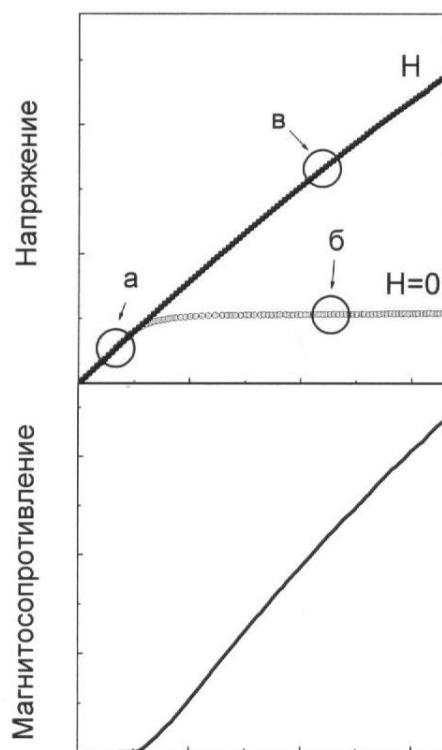


Ток

Фиг. 2

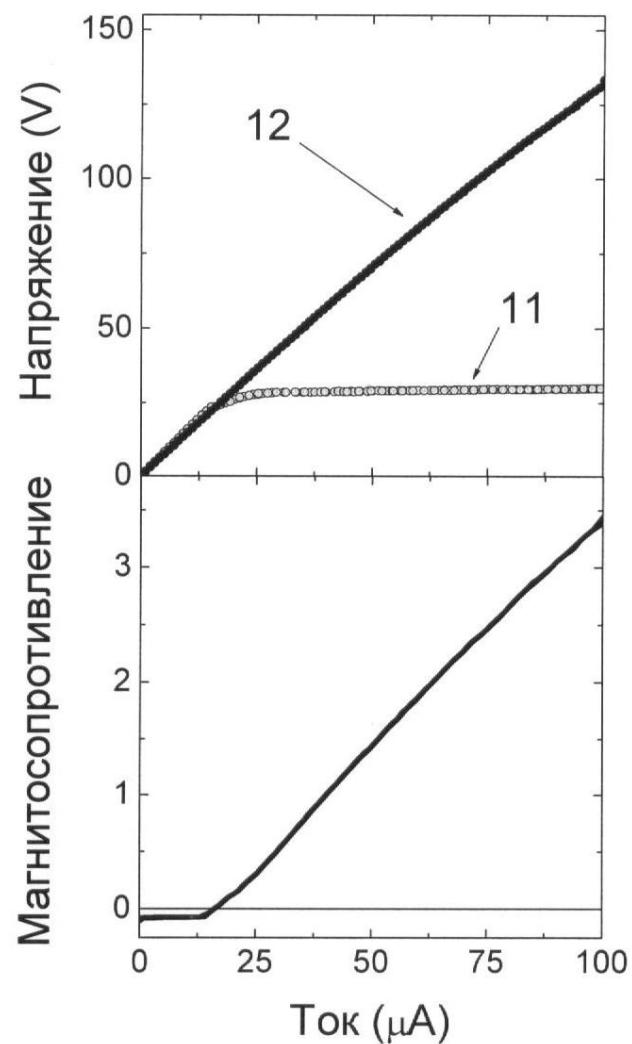


Фиг. 3



Ток

Фиг. 4



Фиг. 5