

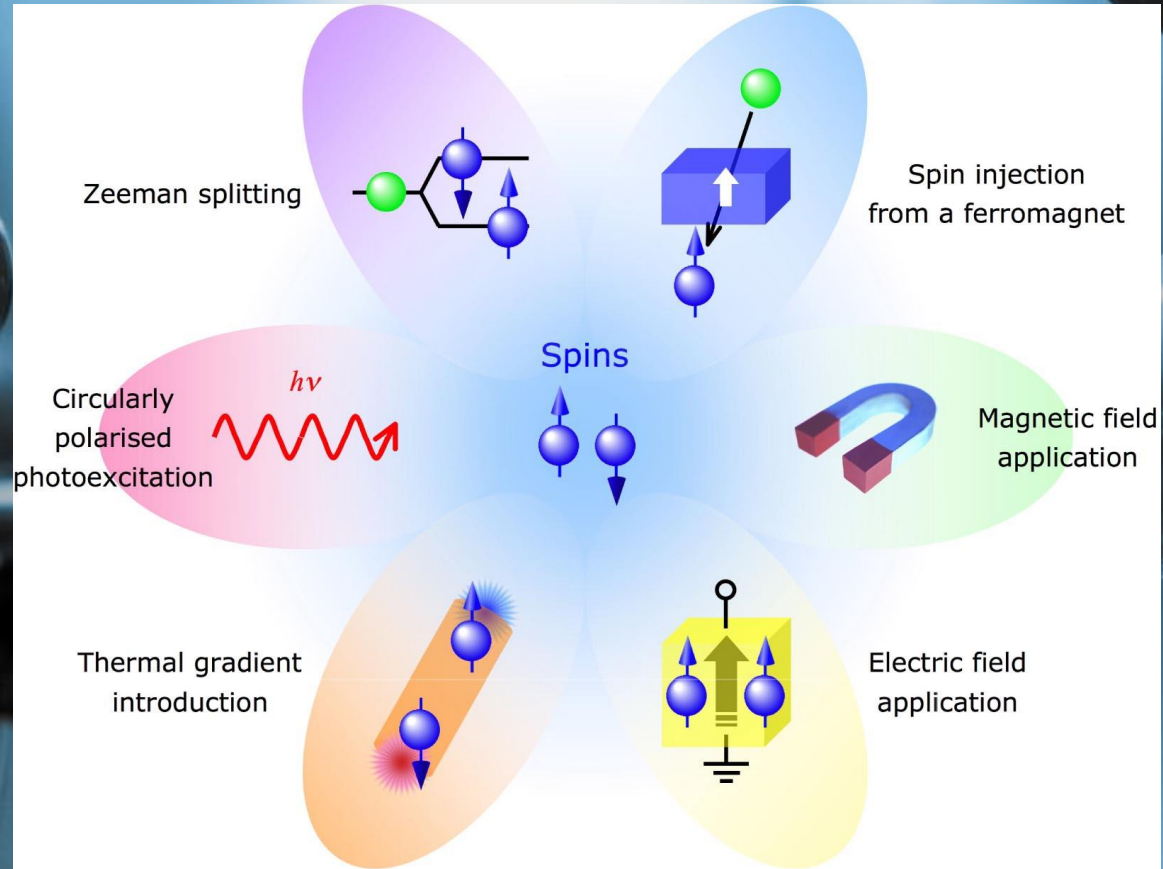
Саратовский национальный исследовательский государственный университет  
имени Н. Г. Чернышевского  
Зональная научная библиотека имени В. А. Артисевич  
Отдел научной информации

# СПИНТРОНИКА. МАГНОНИКА

Виртуальная выставка

Саратов  
2021

Спинтроника (иначе магнетоэлектроника; спиновая электроника) — область твердотельной электроники, основанная на эффекте спинового токопереноса (спин-поляризованного транспорта). В данной области науки и техники изучаются эффекты взаимодействия собственных магнитных моментов электронов (спинов) с электромагнитными полями и на их основе разрабатываются так называемые спинэлектронные приборы и устройства.



Магنونика — область спинтроники, или в более общем смысле электроники, изучающая физические свойства магнитных микро- и наноструктур, свойства распространяющихся спиновых волн, а также возможность применения спиновых волн для построения элементной базы приборов обработки, передачи и хранения информации на основе новых физических принципов.

Термин «спинтроника» был введён и получил широкое распространение в конце XX в. Однако спинтроника, как самостоятельное направление, начала оформляться значительно раньше.

Научные основы спинтроники были заложены в конце XIX – начале XX вв. вместе с созданием и развитием квантовой физики. Наличие спина у электронов и фундаментальные закономерности его проявления в спектрах излучения атомов обнаружены и описаны в работах П. Зеемана, А. Комптона, О. Штерна и В. Герлаха, Дж. Уленбека и С. Гаудсмита, В. Паули, Э. Ферми и П. Дирака.

В 1935 году вышла в свет работа Л. Д. Ландау и Е. М. Лифшица «К теории дисперсии магнитной проницаемости ферромагнитных тел» (*См. Слайд 4*). В этой работе не только решены важные задачи физики магнетизма, актуальные для своего времени, но и фактически сформулирован новый (феноменологический) подход к физике упорядоченных спиновых систем. Основой этого подхода является уравнение динамики намагниченности, впервые записанное авторами статьи и получившее в мировой литературе название уравнения Ландау–Лифшица.

В 1936 году Н. Мотт ввёл концепцию спин-поляризованных токов и предсказал, что в ферромагнетиках электрические токи должны состоять из поляризованных по спину подвижных носителей заряда (*См. Слайд 4*).

Значительное углубление знаний о поведении спиновых систем было достигнуто во второй половине XX в. Среди работ, предвосхитивших развитие спинтроники, отметим пионерские исследования М. И. Дьяконова и В. И. Переля, показавших возможность ориентации спинов при протекании тока (*См. Слайд 5*), А. Г. Аронова и Г. Е. Пикуса по спиновой инжекции в полупроводниках (*См. Слайд 6*), А. Г. Гуревича по магнитным колебаниям и волнам в твёрдых телах (*См. Слайд 7*).

## The Electrical Conductivity of Transition Metals

By N. F. Mott, H. H. Wills Physical Laboratory, University of Bristol

*(Communicated by R. H. Fowler, F.R.S.—Received September 23, 1935)*

1—In a recent paper\* certain properties of the transition metals Ni, Pd, and Pt and of their alloys with Cu, Ag, and Au have been discussed from the point of view of the electron theory of metals based on quantum mechanics. In particular, a qualitative explanation was given of the relatively high electrical resistance of the transition metals. It was shown from an examination of the experimental evidence that the conduction electrons in these metals have wave functions derived mainly from  $s$  states just as in Cu, Ag, and Au, and that the effective number of conduction electrons is not much less than in the noble metals. On the other hand, the mean free path is much smaller, because under the influence of the lattice vibrations the conduction electrons may make transitions to the unoccupied  $d$  states, and the probability of these transitions is several times greater than the probability of ordinary scattering. Since the unoccupied  $d$  states are responsible for the ferromagnetism or high paramagnetism of the transition elements, there is a direct connexion between the magnetic properties and the electrical conductivity.

The purpose of this paper is as follows: in §§ 2, 3, and 4 we develop a formal theory of conductivity for metals, such as the transition metals, where two Brillouin zones are of importance for the conductivity; in § 5 we apply the theory to show why, at high temperatures, the temperature coefficient of the paramagnetic metals Pd and Pt falls below the normal value; and in § 6 we discuss the resistance of ferromagnetic metals, and show in § 7 qualitatively why constantan (Cu-Ni) has zero temperature coefficient at room temperature.

2—The element nickel has in the lowest state the electronic configuration  $(3d)^8(4s)^2$ , but states with the configurations  $(3d)^9(4s)^1$ ,  $(3d)^{10}$  are separated from it by energies of only a few electron volts. In our theory we shall use essentially a “one-electron” picture, *i.e.*, we treat the electrons, in the first approximation, as moving independently of one another in an electrostatic field. We must therefore suppose that, for a single electron

Mott, N. F. The electrical conductivity of transition metals // N. F. Mott. — DOI: 10.1098/rspa.1936.0031. — Текст : непосредственный // Proceedings of the Royal Society of London A. — 1936. — Vol. 153. — P. 699–717. — Библиогр.: в сноскоке (21 назв.). — Имеется электронная версия печатной публикации. — URL: <https://royalsocietypublishing.org/doi/10.1098/rspa.1936.0031> (дата обращения: 12.02.2021). — Режим доступа: свободный. — ISSN 0370-1662.

Барьяхтар, В. Г. Уравнение Ландау–Лифшица. 80 лет истории, успехи и перспективы / В. Г. Барьяхтар, Б. А. Иванов. — Текст : непосредственный // Физика низких температур. — 2015. — Т. 41, № 9. — С. 855–863 : 1 рис. — Библиогр.: с. 861–863 (83 назв.). — Имеется электронная версия печатной публикации. — URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=24156650> (дата обращения: 10.02.2021). — Режим доступа: свободный. — ISSN 0132-6414.

## Уравнение Ландау–Лифшица

80 лет истории, успехи и перспективы

В.Г. Барьяхтар, Б.А. Иванов

Восемьдесят лет назад вышла в свет работа Л.Д. Ландау и Е.М. Лифшица «К теории дисперсии магнитной проницаемости ферромагнитных тел» (*Phys. Zs. Sowjetunion* 8, 153 (1935)). Для современного читателя удобно пользоваться переводом этой работы в сборнике [1], и далее при цитировании номера страницы указываются по этому переводу. Отметим также удобный английский источник [2]. Развитие физики магнитных явлений показало, что содержащиеся в этой статье результаты оказались гораздо шире, чем было сформулировано в ее названии. В этой работе не только решены важные задачи физики магнетизма, актуальные для своего времени, но и фактически сформулирован новый (феноменологический) подход к физике упорядоченных спиновых систем. Основой этого подхода является уравнение динамики намагниченности, впервые записанное авторами статьи и получившее в мировой литературе название уравнения Ландау–Лифшица.

Настоящей статьёй открывается специальный выпуск журнала Физика низких температур «80 лет уравнению Ландау–Лифшица», который будет представлен в номерах 9 и 10. В этой статье кратко обсуждается влияние указанной работы Л.Д. Ландау и Е.М. Лифшица и особенно сформулированного в ней уравнения Ландау–Лифшица на последующее развитие физики магнитных явлений. Мы не претендуем на полную обсуждения темы: своей задачей мы считаем выявление наиболее важных тенденций и закономерностей.

Задача детального изложения истории развития физики магнетизма трудновыполнима и выходит за рамки нашей работы, детали можно найти в монографии [3]. Для цели нашей работы важно отметить, что в 1935 году в физике сильного магнетизма был получен ряд фундаментальных результатов (см. детальнее монографию [3]). В работах В. Гайзенберга (1928 г.) Я.Г. Дорфмана и Я.И. Френкеля (1928 г.) была вскрыта природа ферромагнитного упорядочения, т.е. показано, что оно обусловлено обменным взаимодействием электронов. Кроме того, гипотеза магнитных доменов, сформулированная в интуитивной форме в работе П. Вейсса (1908 г.) и объяснившая природу ненаасыщенного состояния ферромагнетиков, к началу тридцатых годов была проверена экспериментально. Было обнаружено, что домены

намагничены почти однородно и разделены друг от друга междоменными границами, и что ферромагнетик может намагничиваться путем смещения доменной стенки. Сикстус и Тонкс (1931 г.) исследовали динамику уединенной стенки в тонкой ферромагнитной проволоке под действием внешнего магнитного поля  $H$ , снимающего эквивалентность намагниченностей в доменах (продвигающего поля). Они обнаружили, что скорость стенки  $v$  линейно растет с ростом  $H$ , ввели понятие подвижности стенки как отношения ее скорости к величине  $H$  (см. детальнее обзорные работы [4,5]). Отметим только, что к середине 30-х годов теория статических и особенно динамических свойств магнетиков с доменами отсутствовала.

## К ТЕОРИИ ДИСПЕРСИИ МАГНИТНОЙ ПРОНИЦАЕМОСТИ ФЕРРОМАГНИТНЫХ ТЕЛ

Совместно с Е. М. ЛИФШИЦЕМ

Phys. Zs. Sowjet., 8, 153, 1935

Исследовано распределение магнитных моментов в ферромагнитном кристалле. Найден, что такой кристалл состоит из элементарных слоев, намагниченных до насыщения. Во внешнем магнитном поле граница между слоями перемещается; определена скорость этого перемещения. Найдена магнитная проницаемость в периодическом поле, параллельном или перпендикулярном оси легкого намагничивания.

§ 1. Как было указано Блохом [1] и Гейзенбергом [2], ферромагнитный кристалл в магнитном смысле состоит из элементарных областей, намагниченных почти до насыщения. Они предположили, что эти области имеют индивидуальную форму; мы покажем здесь, что их скорее следует считать элементарными слоями. Последнее, по-видимому, можно согласовать с экспериментальными данными, полученными рядом авторов [3] путем фотографирования распределения коллоидных частиц  $Fe_3O_4$  на поверхности ферромагнитного кристалла. В немагнитическом кристалле эти элементарные слои намагничены поочередно в противоположных направлениях, так что кристалл в целом не имеет магнитного момента. При намагничивании кристалла границы между противоположно намагниченными слоями сдвигаются таким образом, что слои с одним направлением магнитного момента растут за счет слоев с моментом в противоположном направлении.

Некоторые авторы (среди них также Ф. Блох [4]) пытались определить число и размеры элементарных областей в ферромагнитном теле из статистических соображений. Однако это абсолютно невозможно, поскольку если бы не существовало намагничивающего влияния поверхности тела, как, например, в бесконечном

Дьяконов, М. И. О спиновой ориентации электронов в межзонном поглощении света в полупроводниках / М. И. Дьяконов, В. И. Перель. – Текст : непосредственный // Журнал экспериментальной и теоретической физики. – 1971. – Т. 60, № 5. – С. 1954-1965 : 2 рис. – Библиогр.: с. 1965 (11 назв.). – ISSN 0044-4510.

**О СПИНОВОЙ ОРИЕНТАЦИИ ЭЛЕКТРОНОВ  
ПРИ МЕЖЗОННОМ ПОГЛОЩЕНИИ СВЕТА В ПОЛУПРОВОДНИКАХ**

М. И. Дьяконов, В. И. Перель

Теоретически исследована зависимость степени ориентации электронов, возбужденных в зону проводимости циркулярно поляризованным светом, от частоты света. Показано, что эта зависимость имеет излом у порога поглощения, связанного с отщепленной валентной подзоной. Рассмотрена спиновая релаксация электронов в кристаллах без центра инверсии, обусловленная спиновым расщеплением зоны проводимости. В случае быстрой спиновой релаксации стационарная ориентация электронов может исчезнуть еще до того, как будет достигнут порог поглощения, связанный с отщепленной подзоной. При этом за порогом снова должна возникнуть ориентация, но знак ее противоположен знаку, имевшемуся до порога. Рассмотрена поляризация излучения, возникающего при рекомбинации ориентированных электронов с дырками.

**1. Введение**

Оптическая ориентация атомов газа хорошо изучена и оказалась весьма эффективным средством исследования атомных процессов [1]. Недавно были проведены первые успешные эксперименты по оптической ориентации свободных электронов в полупроводниках [2-5]. В этих экспериментах межзонное поглощение циркулярно поляризованного света привело к созданию значительной спиновой ориентации электронов в зоне проводимости. Ориентация регистрировалась по измерению возникающей в результате эффекта Оверхаузера ядерной намагниченности [2] или по поляризации люминесценции [3-5].

Возможность оптической ориентации при межзонных переходах в полупроводниках со структурой алмаза или цинковой обманки можно пояснить следующим образом. Если, например, вершина валентной зоны принадлежит представлению  $\Gamma_8$ , а дно зоны проводимости — представлению  $\Gamma_8$ , то правила отбора при межзонном поглощении такие же, как при атомном переходе между уровнями с моментами  $3/2$  и  $1/2$ . В такой схеме при поглощении света, поляризованного по левому кругу, возможны два перехода: из нижнего состояния с магнитным квантовым числом  $\mu = 3/2$  в верхнее состояние с магнитным квантовым числом  $m = 1/2$  и из состояния  $\mu = 1/2$  в состояние  $m = -1/2$ . Здесь  $m$  и  $\mu$  — проекции момента на направление луча света. Вероятности этих переходов относятся как 3 : 1, так что в результате в зону проводимости забрасывается в три раза больше электронов со спином, ориентированным по лучу света, чем электронов с противоположно направленным спином. Это соответствует степени ориентации  $P_0 = 1/2$ . Фотон, поляризованный по левому кругу, имеет проекцию момента количества движения на направление импульса, равную  $-1$ . Этот момент целиком передается кристаллу при поглощении. Однако преимущественное направление спина электрона в зоне проводимости оказывается противоположным направлению спина фотона возбуждающего света. Соответственно, момент дырки, образующейся в валентной зоне, направлен по спину фотона и превышает его на величину, требуемую законом сохранения момента.

В валентной зоне момент быстро релаксирует, а время спиновой релаксации электронов в зоне проводимости может превышать их время жизни.

**CURRENT-INDUCED SPIN ORIENTATION OF ELECTRONS  
IN SEMICONDUCTORS**

M. I. DYAKONOV and V. I. PEREL

A. F. Ioffe Physico-Technical Institute of the Academy of Sciences of the USSR, Leningrad, USSR

Received 12 June 1971

An electrical current in a semiconductor induces spin orientation in a thin layer near the surface of the sample due to spin-orbit effects in scattering of electrons. A weak magnetic field parallel to the current destroys this orientation.

It is well known [1] that scattering of unpolarized electrons by an unpolarized target results in spatial separation of electrons with different spins due to spin-orbit interaction. For this reason an electrical current in a semiconductor should be accompanied by a spin flow perpendicular to the current and directed from the bulk to the surface. It was shown in our previous work [2] that this leads to accumulation of spin orientation in a thin layer near the surface of the sample.

In this letter we consider the influence of a magnetic field on this effect. We also present expressions for the phenomenological constants, introduced in [2], in terms of the scattering amplitude.

Our calculation is based on the following equation for the spin density

$$\partial S_\beta / \partial t + \partial q_{\alpha\beta} / \partial x_\alpha + [\Omega \times S]_\beta + S_\beta / \tau_s = 0, \quad (1)$$

where  $\Omega = \mu_B g H / \hbar$ ,  $\mu_B$ ,  $g$  and  $H$  being the Bohr's magneton,  $g$ -factor and magnetic field respectively,  $\tau_s$  is the spin relaxation time. The density of spin flow tensor  $q_{\alpha\beta}$  may be derived by solving the kinetic equation for the non-diagonal density matrix  $\mathcal{F}_{mm'}(r, p, t)$ . ( $m$  and  $m'$  are spin indices.) Spin-orbit effects in scattering must be included in the collision term. The quantities  $S_\beta$  and  $q_{\alpha\beta}$  are related to  $\mathcal{F}$  in the following way:

$$S_\beta = \int d^3 p \, p_\alpha \hat{\sigma}_\beta \hat{\mathcal{F}}(r, p, t);$$

$$q_{\alpha\beta} = \int d^3 p \, v_\alpha \, p_\beta \hat{\sigma}_\beta \hat{\mathcal{F}}(r, p, t). \quad (2)$$

where  $\hat{\sigma}_\beta$  are Pauli matrices.

We have calculated  $q_{\alpha\beta}$  for a non-degenerate semiconductor with a center of inversion in the case when impurity scattering dominates. Up to

the first order in spin-orbit interaction we obtain

$$q_{\alpha\beta} = -b E_\alpha S_\beta - D \frac{\partial S_\beta}{\partial x_\alpha} + \beta n \epsilon_{\alpha\beta\gamma} E_\gamma + \beta_1 (E_\beta S_\alpha - \partial_\alpha E \cdot S) - \partial_1 \left( \frac{\partial S_\alpha}{\partial x_\beta} - \partial_\alpha \text{div} S \right), \quad (3)$$

where only terms linear in the electrical field  $E$ ,  $S$  and  $\partial S / \partial x$  are kept. In eq. (3)  $b$  and  $D$  are the usual mobility and diffusion coefficient,  $n$  is the electron concentration, assumed to be constant. The coefficients  $\beta$  and  $\beta_1$  are the real and imaginary parts of a single expression

$$\beta + i\beta_1 = \frac{e}{m} N \langle \tau^2 \rangle v \cdot 2\pi \int_0^\pi \int_{AB} \sin^2 \theta d\theta, \quad (4)$$

where  $N$  is the impurity concentration,  $\tau$  ( $\tau$ ) is the usual relaxation time, brackets stand for averaging over the Maxwell distribution,  $A$  and  $B$  are the quantities entering the expression for the scattering amplitude [3]

$$\hat{f} = A + B \hat{\sigma} [\mathbf{p} \times \mathbf{p}'] (p^2 \sin \theta)^{-1}, \quad (5)$$

$\delta_1 = kT\beta_1/e$ , which is the Einstein relation.

The equation for the density of electron flow

$$\mathbf{q} = -bn\mathbf{E} - \beta[\mathbf{E} \times \mathbf{S}] - \partial \text{rot} \mathbf{S} \quad (6)$$

contains additional terms due to spin-orbit interaction,  $\delta = kT\beta/e$ . The second term in eq. (6) is responsible for the anomalous Hall effect. Note that the constants entering eq. (3) are the same as in eq. (6).

Numerous terms depending on magnetic field are ignored in eqs. (3) and (6). These terms are unimportant for our purposes until  $\Omega\tau < 1$  - a condition we assume to be fulfilled. At the same time the value of  $\Omega\tau$  may be large, since  $\tau_s > \tau$ .

СПИНОВАЯ РЕЛАКСАЦИЯ ЭЛЕКТРОНОВ ПРИ РАССЕЯНИИ  
НА ДЫРКАХ

Г. Л. Бир, А. Г. Аронов, Г. Е. Пикус

Вычислено время спиновой релаксации электронов, вызываемой обменным и аннигиляционным взаимодействием электронов и свободных и связанных дырок. Показано, что этот механизм может играть определяющую роль в условиях оптической ориентации электронов в полупроводниках. Построена теория спиновой релаксации электронов при сильном рассеянии дырок на примесях и при учете быстрой релаксации спина дырки. Показано, что скорость спиновой релаксации электронов на дырках пропорциональна времени взаимодействия с дыркой, т. е. времени, в течение которого расстояние между ними остается меньше длины волны электрона. В условиях, когда это время равно времени диффузии дырок через область взаимодействия, интенсивное рассеяние дырок приводит к уменьшению времени спиновой релаксации электрона. Наоборот, в условиях, когда время спиновой релаксации дырок становится меньше времени взаимодействия, интенсивная спиновая релаксация дырок приводит к увеличению времени спиновой релаксации электрона из-за эффективного усреднения спина дырок.

## § 1. Введение

В опытах по оптической ориентации электронов в ряде кристаллов групп  $A_2B_3$  и  $A_3B_5$  обычно используются образцы с высокой концентрацией равновесных дырок, благодаря чему удается наблюдать достаточно интенсивную люминесценцию (см. обзоры [1, 2]). В этих условиях основным механизмом спиновой релаксации электронов может быть их рассеяние на дырках с переворотом спина. На существенную роль этого механизма указывает обнаруженная в ряде работ зависимость времени спиновой релаксации электронов от концентрации дырок, в частности значительное уменьшение времени спиновой релаксации электронов в образцах  $p$ -типа по сравнению с образцами  $n$ -типа [3].

Как показано ниже, рассеяние электронов на дырках с переворотом спина может быть обусловлено как обменным, так и аннигиляционным взаимодействием, которое приводит к продольно-поперечному расщеплению экситонных уровней. Оба эти взаимодействия носят контактный характер [4].

Рассеяние электронов на дырках с переворотом спина мы будем рассматривать в борновском приближении и учитывать, что волновая функция электронно-дырочной пары из-за кулоновского взаимодействия может отличаться от плоской волны.

Гамильтониан взаимодействия электрона с дыркой с переворотом спина можно представить в виде

$$\mathcal{H} = \pi a_B^3 \hat{D} \delta(\mathbf{r}) \delta_{\mathbf{k}, \mathbf{k}'}, \quad (1)$$

где  $\mathbf{r} = \mathbf{r}_e - \mathbf{r}_h$  — разность координат электрона и дырки,  $a_B = \kappa_0 / e^2 m$  — борновский радиус экситона (всюду в работе  $\hbar = 1$ ),  $m^{-1} = m_e^{-1} + m_h^{-1}$ ,  $\kappa_0$  — статическая диэлектрическая постоянная,  $\mathbf{K} = \mathbf{k} + \mathbf{p}$  — суммарный импульс элект-

Бир, Г. Л. Спиновая релаксация электронов, рассеиваемых дырками / Г. Л. Бир, А. Г. Аронов, Г. Е. Пикус. — Текст : непосредственный // Журнал экспериментальной и теоретической физики. — 1975. — Т. 69, № 4. — С. 1382-1397 : 5 рис. — Библиогр.: с. 1397 (12 назв.). — ISSN 0044-4510.

Аронов, А. Г. Спиновая инжекция в полупроводниках / А. Г. Аронов, Г. Е. Пикус. — Текст : непосредственный // Физика и техника полупроводников. — 1976. — Т. 10, № 6. — С. 1177-1180 : 4 рис. — Библиогр.: с. 1179-1180 (10 назв.). — ISSN 0015-3222.

УДК 621.315.592

## СПИНОВАЯ ИНЖЕКЦИЯ В ПОЛУПРОВОДНИКАХ

А. Г. Аронов, Г. Е. Пикус

При пропускании тока через контакт ферромагнетик—полупроводник возникает инжекция спинов. В зависимости от типа контакта при этом возможна поляризация как основных, так и неосновных носителей. Исследуется влияние магнитного поля на спиновую инжекцию и обсуждены условия наблюдения.

1. Разнообразные эффекты, возникающие при спиновой ориентации электронов в полупроводнике, являются в настоящее время предметом интенсивных исследований. В этих экспериментах ориентация носителей тока осуществляется возбуждением поляризованным светом (см., например, обзоры [1, 2]).

В работе [3] было высказано предположение о возможности ориентации неосновных носителей, инжектированных из ферромагнетика через запирающий контакт. В настоящей работе мы хотим обратить внимание на возможность ориентации основных носителей в полупроводниках инжекцией спинов из ферромагнитных материалов. Мы обсудим также влияние поперечного магнитного поля на ориентацию основных и неосновных носителей.

В ферромагнитных полупроводниках степень поляризации электронов проводимости определяется соотношением обменного расширения зоны проводимости и их энергии Ферми и достигает 100%. Опыты Тедрова и Месервея [4] показали, что степень поляризации туннельного тока через контакт ферромагнетик— $Al_2O_3$ — $Al$  достигает в  $Ni$  11%, в  $Co$  34% и в  $Fe$  44%. Эксперименты по внешнему фотоэффекту из ферромагнетиков также показали высокую степень поляризации фотоэлектронов [5]. Это свидетельствует об отсутствии заметной деполяризации электронов при их выходе из ферромагнетика.

Прохождение тока через контакт ферромагнетик—полупроводник будет сопровождаться потоком спинов через границу. В результате диффузии электронов и их дрейфа в электрическом поле область поляризации спинов будет распространяться в глубь полупроводника. Степень поляризации электронов в потоке определяется их поляризацией в ферромагнетике. При сложной поверхности Ферми в ферромагнетике она также может зависеть от направления тока относительно кристаллографических осей из-за различия коэффициентов отражения от барьера для электронов с противоположными спинами при том же волновом векторе. Кроме того, степень поляризации зависит от характера прохождения носителей через контакты и может быть различной при туннельном механизме, исследованном в [6], для объяснения экспериментов [4], и термоэмиссионном механизме. Поэтому спиновая инжекция позволяет в принципе изучать как свойства поляризованных электронов в полупроводниках, так и особенности поверхностей Ферми в ферромагнетиках, а также контактные явления. В зависимости от условий на контакте ток из ферромагнетика в полупроводник может создаваться носителями обоих знаков [7]. Ниже мы рассмотрим предельные случаи, когда перенос осуществляется только основными носителями или только неосновными. В последнем случае

A 856831

А. Г. ГУРЕВИЧ, Г. А. МЕЛКОВ

МАГНИТНЫЕ  
КОЛЕБАНИЯ  
И ВОЛНЫ

A851675, A856831

Гуревич, А. Г. Магнитные колебания и волны / А. Г. Гуревич, Г. А. Мелков. – Москва : Физматлит : Наука, 1994. – 464 с. : 17 табл., 240 рис. – Библиогр.: с. 448-459 (466 назв.). – ISBN 5-02-014366-9. – Текст : непосредственный.

Излагаются физические представления и основы теории ферромагнитного и антиферромагнитного резонансов и спиновых волн; основы электродинамики гиротропных сред и принципы построения ферритовых СВЧ устройств. Рассматриваются нелинейные явления, в частности, параметрическое возбуждение спиновых волн; взаимодействие колебаний и волн намагниченности с упругими волнами и носителями заряда; процессы релаксации.

A. 582720

МАГНИТНЫЙ РЕЗОНАНС  
В ФЕРРИТАХ  
И АНТИФЕРРОМАГНЕТИКАХ

А. Г. ГУРЕВИЧ

A227001, A227002, A582720-A582723

Гуревич, А. Г. Магнитный резонанс в ферритах и антиферромагнетиках / А. Г. Гуревич. – Москва : Главная редакция физико-математической литературы : Наука, 1973. – 592 с. : 8 табл., 29 рис. – Библиогр.: 574-591 (573 назв.). – Текст : непосредственный.

Книга представляет собой введение в теорию магнитных колебаний (или магнитного резонанса) в магнитоупорядоченных средах: ферро-, ферри- и антиферромагнетиках. Рассматриваются процессы, происходящие при достаточно малых амплитудах колебаний – линейные явления. Излагается макроскопическая теория малых магнитных колебаний: однородных (ферромагнитный и антиферромагнитный резонансы) и неоднородных (магнитоэластические колебания и спиновые волны). Излагаются также основы электродинамики систем, содержащих намагниченные (гиротропные) среды. Рассматривается и микроскопическая теория магнитных колебаний. Сравнительно подробно исследуются процессы релаксации, ответственные за диссипацию энергии магнитных колебаний.

A852996

А.В. ВАШКОВСКИЙ  
В.С. СТАЛЬМАХОВ  
Ю.П. ШАРАЕВСКИЙМАГНИТОСТАТИЧЕСКИЕ  
ВОЛНЫ В ЭЛЕКТРОНИКЕ  
СВЕРХВЫСОКИХ  
ЧАСТОТ

A852996, A852997, A852998, A879529

Вашковский, А. В. Магнитостатические волны в электронике сверхвысоких частот : учебное пособие для физических специальностей университетов / А. В. Вашковский, В. С. Стальмахов, Ю. П. Шараевский. – Саратов : Издательство Саратовского университета, 1993. – 311 с. : 205 рис. – Библиогр.: с. 301-308 (156 назв.). – ISBN 5-292-00650-5. – Текст : непосредственный.

Книга написана на основе курса лекций, читаемых студентам физического факультета Саратовского университета. Учебное пособие состоит из 15 лекций, в которых рассматриваются линейные волновые явления на магнитостатических волнах, нелинейные процессы, оптика магнитостатических волн, прикладные вопросы использования магнитостатических волн в электронике СВЧ, а также приводятся данные экспериментальных исследований.

A589960

В.С. СТАЛЬМАХОВ, А. А. ИГНАТЬЕВ

ЛЕКЦИИ  
ПО СПИНОВЫМ ВОЛНАМ

A589960, A589961, A589962, A589963, A589964

Стальмахов, В. С. Лекции по спиновым волнам : Часть I / В. С. Стальмахов, А. А. Игнатъев. – Саратов : Издательство Саратовского университета, 1983. – 182 с. : 107 рис. – Библиогр.: с. 174-177 (54 назв.). – Текст : непосредственный.

Книга написана на основе курса лекций, читаемого авторами студентам-радиофизикам на физическом факультете Саратовского университета, и является **первым отечественным учебным пособием по магнитостатическим волнам**. В лекциях излагаются общие сведения о магнитных диэлектриках и их свойствах на СВЧ, основы СВЧ электродинамики спиновых магнитостатических волн, прикладные и технические аспекты их использования в различных СВЧ устройствах. В учебное пособие **включены результаты оригинальных исследований последних лет**.



Новый толчок спинтроники получила благодаря открытию эффекта туннельного магнитосопротивления (М. Жюльер, 1975) и эффекта гигантского магнитосопротивления (П. Грюнберг, А. Ферт, 1988, Нобелевская премия по физике за 2007 год) (*См. Слайды 10, 11*).

Свой вклад в развитие теории, постановки экспериментов, а также применения спинтроники внесли и продолжают вносить учёные Саратовского университета (*См. Слайды 8, 27, 28*).

Менее чем за двадцать лет применение спинтронных явлений дало возможность существенно повысить ёмкость внешних накопителей, распространив технологию жёстких дисков на такие мобильные устройства, как фото- и видеокамеры и портативные мультимедийные плееры. Спинтроники проникла в область автомобильной промышленности и биомедицинские технологии, а объединившись с применением эффектов туннельного магнетосопротивления и явлений переноса спина, готовит платформу для внедрения в технологии оперативной памяти компьютеров и микроволновых источников мобильных телефонов. Современные научные исследования явлений переноса спина, мультиферроиков, исследования в области полупроводниковой и молекулярной спинтроники открывают новые горизонты для многих практических применений. Другая перспектива спинтроники предполагает использование квантовомеханических свойств спина и продолжительного времени когерентности спина в наноразмерных структурах в других, гораздо более революционных приложениях, связанных с квантовыми компьютерами. Подробная хронология достижений спинтроники представлена на сайте Spintronics-info (*См. Слайды 12, 13*).

# Успехи физических наук



Журнал основан в 1918 г.

2008 декабрь  
том 178

№ 12

Нанотехнологии позволяют изготовить чувствительные считывающие головки для компактных жёстких дисков. – DOI: 10.3367/UFNr.0178.200812e.1335. – Текст : непосредственный // Успехи физических наук. – 2008. – Т. 178, № 12. – С. 1335. – Имеется электронная версия печатной публикации. – URL: <https://ufn.ru/ru/articles/2008/12/e> (дата обращения: 10.02.2021). – Режим доступа: свободный. – ISSN 0042-1294.

Декабрь 2008 г.

Том 178, № 12

## УСПЕХИ ФИЗИЧЕСКИХ НАУК

НОБЕЛЕВСКИЕ ЛЕКЦИИ ПО ФИЗИКЕ — 2007

### Нанотехнологии позволяют изготовить чувствительные считывающие головки для компактных жестких дисков

PACS numbers: 01.10.Fv

DOI: 10.3367/UFNr.0178.200812e.1335

9 октября 2007 г. по решению Шведской Королевской академии наук Нобелевская премия по физике за 2007 г. была присуждена совместно Альберу Ферту (Albert Fert) (Совместная физическая лаборатория CNRS/Thales, Университет Париж-Юг, Орсе, Франция) и Петеру Грюнбергу (Peter Grünberg) (Исследовательский центр Юлиха, Германия) за открытие явления гигантского магнетосопротивления.



Альбер Ферт



Петер Грюнберг

В этом году премия по физике присуждена за технологию, которая используется для считывания данных в жестких дисках. Именно благодаря этой технологии стала возможной радикальная миниатюризация жестких дисков, произошедшая в последние годы. Чувствительные считывающие головки необходимы для считывания данных, например, с компактных жестких дисков в портативных компьютерах или некоторых музыкальных проигрывателях.

В 1988 г. француз Альбер Ферт и немец Петер Грюнберг независимо друг от друга открыли совершенно новый физический эффект — гигантское магнетосопротивление (ГМС). Очень слабые изменения магнитных свойств приводят к значительным изменениям электрического сопротивления в ГМС-системах. Системы такого типа — это оптимальный инструмент для считывания данных с жестких дисков, когда магнитная информация должна быть преобразована в электрический ток. Вскоре исследователи и инженеры начали работу по использованию этого эффекта в считывающих головках. В 1997 г. была выпущена первая считывающая головка на основе эффекта ГМС, и вскоре эта технология стала стандартной. Даже самые современные технологии считывания являются дальнейшими разработками ГМС.

Жесткий диск хранит информацию, например музыку, в микроскопических областях, намагниченных в различных направлениях. Информация восстанавливается с помощью считывающей головки, которая сканирует диск и регистрирует изменение намагниченности. Чем меньше и компактнее жесткий диск, тем меньше размеры отдельных магнитных областей и меньше величины их магнитных моментов. Следовательно, для более плотной записи информации на жесткий диск требуются более чувствительные считывающие головки. Считывающие головки на основе эффекта ГМС могут преобразовать очень малые изменения намагниченности в изменения электрического сопротивления и, следовательно, в изменения тока на выходе устройства. Ток — это сигнал со считывающей головки, и различные значения силы тока соответствуют единицам и нулям.

Эффект ГМС был открыт благодаря новым технологиям, разработанным в 1970-е годы для изготовления очень тонких пленок различных материалов. Чтобы эффект ГМС заработал, требуются структуры, состоящие из слоев толщиной всего в несколько атомов. По этой причине ГМС может рассматриваться как одно из первых практических применений многообещающей области — нанотехнологии.

Информация Нобелевского комитета  
(Перевод с английского)

Дополнительную информацию см. на официальном веб-сайте Нобелевского комитета:  
[http://nobelprize.org/nobel\\_prizes/physics/laureates/2007/index.html](http://nobelprize.org/nobel_prizes/physics/laureates/2007/index.html)

Ферт, А. / От спиновых волн к гигантскому магнетосопротивлению и далее // П. А. Грюнберг. – DOI: 10.3367/UFNr.0178.200812f.1336. – Текст : непосредственный // Успехи физических наук. – 2008. – Т. 178, № 12. – С. 1336-1348 : 13 рис. – Библиогр.: с. 1348 (75 назв.). – Материалы Нобелевской лекции. – Имеется электронная версия печатной публикации. – URL: <https://ufn.ru/ru/articles/2008/12/f> (дата обращения: 10.02.2021). – Режим доступа: свободный. – ISSN 0042-1294.

НОБЕЛЕВСКИЕ ЛЕКЦИИ ПО ФИЗИКЕ — 2007

## Происхождение, развитие и перспективы спинтроники

А. Ферт

(Нобелевская лекция. Стокгольм, 8 декабря 2007 г.)

PACS numbers: 01.10.Fv, 72.25.-b, 75.47.De, 85.75.Bb

DOI: 10.3367/UFNr.0178.200812f.1336

### Содержание

1. Введение (1336).
  2. От спин-зависимой проводимости в ферромагнетиках к гигантскому магнетосопротивлению (1336).
  3. Золотой век гигантского магнеторезистивного эффекта (1339).
  4. Гигантский магнеторезистивный эффект в геометрии "ток перпендикулярен плоскости" и явление спиновой аккумуляции (1340).
  5. Магнитные туннельные переходы и туннельный магнеторезистивный эффект (1341).
  6. Магнитное переключение и генерация микроволн в результате переноса спина (1344).
  7. Полупроводниковая и молекулярная спинтроника (1346).
  8. Заключение (1347).
- Список литературы (1348).

### 1. Введение

Электроны обладают зарядом и спином, но до недавнего времени их зарядовые и спиновые свойства рассматривались по отдельности. В классической электронике заряды электронов подвергаются воздействию электрических полей, при этом спиновыми свойствами электронов обычно пренебрегают. Другие традиционные прикладные направления, например, магнитная запись, используют свойства спина, но только применительно к такой макроскопической характеристике, как намагниченность ферромагнетика. Эта картина начала качественно меняться в 1988 г. с момента открытия гигантского магнеторезистивного эффекта (гигантского магнетосопротивления, или ГМС) [1, 2] в магнитных многослойных пленках, положившего начало эффективному управлению движением электронов путем воздействия на их спиновые моменты. Открытие этого явления инициировало активную работу в новой области исследований и технологий, именуемой сейчас спинтроникой, в которой используется действие спина на подвижность электронов в ферромагнитных металлах. Фактически модель, описывающая влияние спина на подвижность электронов в ферромагнитных металлах, впервые предложенная Мот-

А. Ферт (A. Fert), Unité Mixte de Physique CNRS/Thales, 91767, Palaiseau, and Université Paris-Sud, 91405, Orsay, France

том [3], была экспериментально продемонстрирована и теоретически описана в моей диссертационной работе более чем за десять лет до открытия в 1988 г. явления ГМС. Гигантский магнеторезистивный эффект стал первой ступенью на пути к применению подобного воздействия для управления электрическим током, а его применение в считывающих головках жестких дисков внесло значительный вклад в быстрое увеличение плотности записи информации и привело к распространению технологий внешних накопителей на область бытовой электроники. Позже развитие спинтроники открыло и много других эффектов, связанных с управлением и воздействием на спиновые токи. Сегодня эта область научных исследований значительно расширяется в таких многообещающих новых направлениях, как явление переноса спина, полупроводниковая, молекулярная или одноэлектронная спинтроника.

### 2. От спин-зависимой проводимости в ферромагнетиках к гигантскому магнетосопротивлению

ГМС и спинтроника берут свое начало в ранее существовавших исследованиях по влиянию спина на электрическую проводимость в ферромагнитных металлах [3–5]. Механизм спин-зависимой проводимости может быть понят из стандартной зонной структуры ферромагнитного металла, представленной на рис. 1а<sup>1</sup>. Расщепление энергетических уровней, относящихся к ориентациям спинов "вверх" и "вниз" (в англоязычной научной литературе эти направления называются "majority spin" и "minority spin" по аналогии с понятием "основных" и "неосновных" носителей в физике полупроводников. — *Примеч. перевод.*), приводит к тому, что на уровне Ферми носители тока (электроны) находятся в разных состояниях, соответствующих противоположным ориентациям спинов, и проявляют разные свойства проводимости. Такая модель спин-зависимой проводимости была предложена Моттом [3] в 1936 г. для объяснения некоторых особенностей поведения электрического сопротивления ферромагнитных металлов вблизи температуры Кюри.

<sup>1</sup> В электронной версии Нобелевской лекции рисунки даны в цветном изображении (см. сайт УФН [www.ufn.ru](http://www.ufn.ru)).

Грюнберг, П. А. / От спиновых волн к гигантскому магнетосопротивлению и далее // П. А. Грюнберг. – DOI: 10.3367/UFNr.0178.200812g.1349. – Текст : непосредственный // Успехи физических наук. – 2008. – Т. 178, № 12. – С. 1349-1358 : 14 рис. – Библиогр.: с. 1358 (13 назв.). – Материалы Нобелевской лекции. – Имеется электронная версия печатной публикации. – URL: <https://ufn.ru/ru/articles/2008/12/g> (дата обращения: 10.02.2021). – Режим доступа: свободный. – ISSN 0042-1294.

НОБЕЛЕВСКИЕ ЛЕКЦИИ ПО ФИЗИКЕ — 2007

## От спиновых волн к гигантскому магнетосопротивлению и далее

П.А. Грюнберг

(Нобелевская лекция. Стокгольм, 8 декабря 2007 г.)

PACS numbers: 01.10.Fv, 72.25.-b, 75.47.De, 85.75.Bb

DOI: 10.3367/UFNr.0178.200812g.1349

### Содержание

1. Открытие явления рассеяния света на поверхностных спиновых волнах Деймона – Эшбаха (1349).
  2. Бриллюэновское рассеяние света на спиновых волнах в тонких магнитных пленках (1350).
  3. Связанные дипольные моды Деймона – Эшбаха в магнитных пленках с параллельным и антипараллельным магнитным упорядочением (1351).
  4. Двухслойная пленка при наличии обмена через промежуточный слой (1351).
  5. Открытие антиферромагнитного взаимодействия через промежуточный слой (1352).
  6. Открытие гигантского магнетосопротивления (1354).
  7. Гигантское магнетосопротивление: модель Кэмпи – Барнаса (1356).
  8. Переключение намагниченности током (1357).
  9. Применение (1357).
- Список литературы (1358).

### 1. Открытие явления рассеяния света на поверхностных спиновых волнах Деймона – Эшбаха

Институт магнетизма в составе Отделения физики твердого тела Исследовательского центра в г. Юлих (Германия), в котором я начал работать в 1972 г., был основан в 1971 г. профессором В. Зинном. Основной темой исследований являлось изучение магнитных полупроводников EuO и EuS, имеющих температуру Кюри  $T_C = 60$  и  $17$  К соответственно. Поскольку ранее я уже имел дело с методами исследования материалов при помощи рассеяния света, было очень интересно применить эти методы для наблюдения спиновых волн в магнитных материалах.

При исследовании спиновых волн методами рассеяния света используют либо решеточный спектрометр (спектроскопия комбинационного рассеяния), либо спектрометр бриллюэновского рассеяния света (БРС). (В российских изданиях обычно используется термин

П.А. Грюнберг (P.A. Grünberg), Institut für Festkörperforschung, Forschungszentrum Jülich, Germany

"рассеяние Мандельштама – Бриллюэна". — *Примеч. научного редактора.*) В последнем случае для частотного анализа рассеянного света применяют интерферометр Фабри – Перо (рис. 1). Центральная часть спектрометра бриллюэновского рассеяния состоит из двух зеркал Фабри – Перо, расстояние между которыми плавно меняют в процессе работы, сканируя нужный частотный диапазон. Спектроскопию БРС используют в случае, когда частотный сдвиг рассеянного излучения мал (меньше 100 ГГц), что обычно выполняется при рассеянии на спиновых волнах в ферромагнетиках.

В начале 1970-х годов швейцарский физик Дж.А. Сандеркер сделал одно очень важное усовершенствование в технике БРС. Им был изобретен многопроходный режим работы, а чуть позднее — комбинация двух многопроходных интерферометров. Поскольку в то время у нас была возможность организовать и оборудовать новую лабораторию, было принято решение установить именно спектрометр БРС, в котором первоначально использовался один трехпроходный интерферометр, как показано на рис. 1. Имея в арсенале такое оборудование, мы начали исследование спиновых волн в EuO.

Наблюдая спектры БРС, мы смогли обнаружить и идентифицировать ожидаемые спиновые волны, соответствующие пикам  $M_1^{AS}$  и  $M_2^S$  на рис. 1<sup>1</sup>. Различие в интенсивности стоксовой (S) и антистоксовой (AS) компонента было известно ранее и связано с магнитооптическим взаимодействием света со спиновыми волнами.

Вначале происхождение пиков  $M_2^{AS}$ ,  $M_2^S$  на рис. 1 представляло загадку, пока не произошло одно удачное событие. Удачным событием в данном случае явилась поломка системы, ее починка и случайное перепутывание местами проводов при подключении электромагнита к источнику напряжения. К нашему удивлению, стоксова и антистоксова компоненты БРС при этом поменялись местами. Чтобы объяснить это явление, необходимо учесть, что стоксова и антистоксова компоненты рассеяния зависят от направления распространения наблюдаемой моды, которое противоположно в двух рассматриваемых случаях. Причину такой зависимости можно понять, если вспомнить про смещение Доплера, которое при движении волны к наблюдателю происходит в

<sup>1</sup> В электронной версии Нобелевской лекции рисунки даны в цветном изображении (см. сайт УФН [www.ufn.ru](http://www.ufn.ru)).

## Spintronics history

Article last updated on: Nov 02, 2020

### The Early Years

- › 1988 - Giant Magnetoresistive Effect (GME) discovered by Albert Fert in France and Peter Gruenberg in Germany.
- › 1989 - IBM scientists made a string of key discoveries about the "giant magnetoresistive" effect in thin-film structures.
- › 1997 - first GMR (Giant magnetoresistive) Harddisk head introduced by IBM.
- › 2000 - University of Buffalo get 10\$ million to developr specific ferromagnetic materials for use in "spintronics
- › 2001 - University of Arkansas physicists have successfully injected a stream of electrons with identical spins into a semiconductor.
- › 2001 - IBM's 'Pixie Dust' Breakthrough to Quadruple Disk Drive Density
- › 2002 - A new device allows the polarization (or spin) of an electron to determine the switching of the device
- › 2002 - Plastic Shows Promise For Spintronics, Magnetic Computer Memory
- › 2003 - Min Ouyang and David Awschalom of the University of California at Santa Barbara have transferred electron spins across molecular 'bridges' between quantum dots for the first time.

### 2004

- › February - Jing Shi and colleagues at the University of Utah in the US have made the first organic "spin valve"
- › March - A family of silicon-based semiconductors that exhibit magnetic properties has been discovered.
- › June - Electrical detection of the spin resonance of a single electron in a silicon field-effect transistor
- › July - IBM scientists view a single electron spin with a special atomic force microscope
- › November - The Korea Institute of Science and Technology (KIST) and MIT's Francis Bitter Magnet Laboratory have launched a 10-year program in spintronics.

Graphene-Info's  
**Graphene Investment Guide**  
Learn how to profit from the graphene revolution



Download  
Now

Search

### 2005

- › July - New Spintronic Speed Record - 2GHz MRAM devised.
- › July - Discovery of 'Doping' Mechanism in Semiconductor Nanocrystals.

### 2006

- › January - Researchers at the University of Michigan created a computer chip based on the esoteric science of quantum mechanics.
- › February - Breakthrough 1.2 Petabyte Spintronics 3.5 Disk Drive.
- › July - A team of Princeton scientists has turned semiconductors into magnets by the precise placement of metal atoms within a material from which chips are made.
- › July - Freescale begins selling 4-Mbit MRAM.
- › September - Spin Hall effect detected at room temperature.

### 2007

- › February - New European Initiative To Develop Spintronics Computing Devices
- › April - University of Delaware receives \$1.9 million for new spintronics center
- › May - First breakthrough in applying spin-based electronics to silicon
- › June - UCSD Physicists Devise Viable Design For Spin-Based Electronics
- › October - Nobel prize for Giant Magnetoresistance discovery

### 2008

- › April - IBM shows New racetrack memory technology
- › June - IBM and ETH Zurich university build joint nanotech lab, with Spintronics as one of the research targets
- › October - New research centre in Ohio University will work on Spintronics

### ★ Popular Stories ★

Weekly Monthly Yearly

- › Researchers demonstrate the potential of a new quantum material for creating two spintronic technologies
- › Quantum computing enables characterization of magnetic materials
- › New principle may open the door to spin memory devices
- › IMEC and Intel researchers develop spintronic logic device
- › Researchers find that thickness of magnetic materials can help control their spin dynamics

The  
Graphene  
Handbook

2021 edition

Spintronics history. – Текст : электронный // Spintronics-info : [сайт] / Metaglass LTD. – 2004-2021. – URL: <https://www.spintronics-info.com/history>. – Article last updated on : Nov 02, 2020 (дата обращения: 18.02.2021).

**2009**

- › March - Scientists prove the existence of a 'spin battery'
- › June - Scientists Discover Magnetic Superatoms
- › September - North Carolina State University gets a 1.2M\$ grant to work on molecular spintronics
- › September - Korean researchers created the first spin field-effect transistor
- › November - Researchers manipulated and detected spin at room temperature for the first time
- › December - France launches a 4.2M euro large-scale spintronics project

**2010**

- › October: Thermo-Spintronics chips that run on heat are possible
- › October - Researchers developed a way to reliably read the spin of a single electron
- › December - DARPA grants \$8.4 for spin logic technology research

**2011**

- › January - Researchers manage to generate spin current in Graphene
- › March - Researchers develop room-temperature spintronics transistors
- › March - The ERC grants €1.3 million to CIC nanogune's SPINTRIOS project
- › June - Researchers manufactured a spintronics nano-switch using self-organized magnetic molecules
- › September - The University of Utah opens a new \$21.5 million plasmonics and spintronics research center

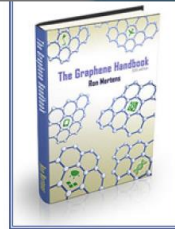
Spintronics history. – Текст : электронный // Spintronics-info : [сайт] / Metaglass LTD. – 2004-2021. – URL: <https://www.spintronics-info.com/history>. – Article last updated on : Nov 02, 2020 (дата обращения: 18.02.2021).

**2012**

- › August - Non-adiabatic spin torque precisely measured for the first time
- › August - IBM and ETH Zurich created a persistent spin helix for 1.1 nanoseconds
- › November - Researchers develop a Graphene-based Spintronics switch
- › November - A new spin amplifier can be used at room temperatures
- › November - Everspin announces the world's first ST-MRAM chip, will ship in 2013

**2013**

- › January - SRC and DARPA grant \$28 million to open a new Spintronics research center
- › January - Spin information can travel much further than thought before
- › June - Researchers managed to control magnetic moments in graphene
- › June - Spintronics text-search chip prototype cuts power reduction by 99%

**2014**

- › January - The EU grants €9.7 million to a six-year Spintronics research project
- › March - New thermoelectric spintronics devices can turn heat into electricity

**2015**

- › January - Graphene magnetism can be introduced while preserving the electronics properties
- › April - Singapore allocates \$3.7 million to support Spintronics research projects
- › April - Spin-based memory cells can be trained to learn like a brain synapse

**2016**

- › April - £2.7 million granted for superconducting spintronics devices R&D
- › June - Researchers develop a low-current solid-state spintronic device
- › June - The EU's graphene flagship project kickstarts graphene spintronics research
- › December - NRL researchers produce spin-filtering at room temperature

**2017**

- › April - Researchers discover the first 2D material with intrinsic ferromagnetism
- › May - Organic-inorganic hybrid perovskites are promising spintronics materials
- › June - Researchers use graphene and CNTs to design an all-carbon spin logic gate
- › July - Researchers develop graphene-based room-temperature spin field-effect transistor

**2018**

- › February - A new alloy break the magnetization density record
- › November - The US NIST to establish a \$10 million spintronics material research facility
- › December - Intel presents a new spintronics device architecture

**2019**

- › February - Researchers develop a 200Mhz spintronics-based microcontroller unit
- › December - Researchers develop single molecular spin switches

**2020**

- › October - New spintronics memory switches its magnetization in 6 picoseconds

A985308

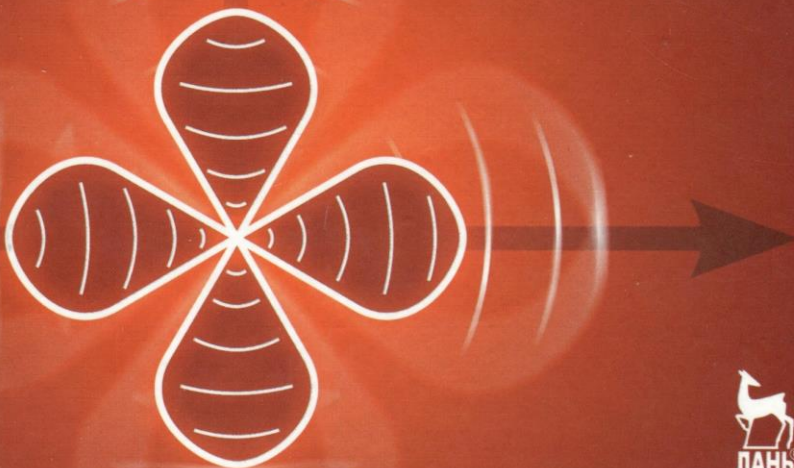
С. С. АПЛЕСНИН

# ОСНОВЫ СПИНТРОНИКИ

A985306, A985307, A985308

Аплеснин, С. С. Основы спинтроники : учебное пособие / С. С. Аплеснин. – 2-е издание, исправленное. – Санкт-Петербург ; Москва ; Краснодар : Лань, 2010. – 287, [1] с. – (Учебники для вузов. Специальная литература). – Библиогр.: с. 283-285 (42 назв.). – ISBN 978-5-8114-1060-6. – Текст : непосредственный.

Приведены основные сведения об электрических и магнитных свойствах твёрдых тел. Рассмотрены физические основы работы твердотельных устройств. Изложены физические процессы управления поведением электронов в твёрдых телах.



К  
Н  
И  
Г  
И

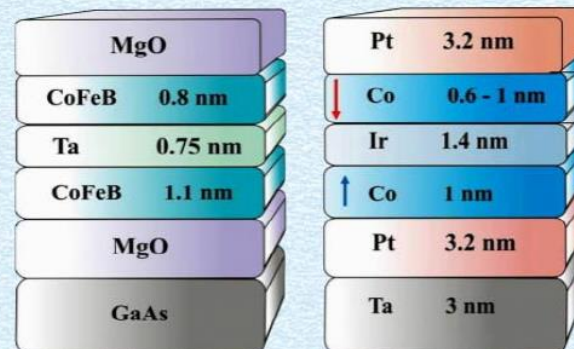
Магнитная релаксация в устройствах спиновой электроники : монография / Р. Б. Моргунов, О. В. Коплак, А. Д. Таланцев, О. С. Дмитриев, А. И. Безверхний. – Тамбов : Издательский центр ФГБОУ ВО «ТГТУ», 2019. – 156 с. : 93 рис. – Библиогр.: с. 147-154 (90 назв.). – ISBN 978-5-8265-2003-1. – Текст : непосредственный.

Описаны современные представления в области спинтроники и её реализации в реальных устройствах. Основное внимание уделено сенсорике – области спинтроники, направленной на разработку технологий сенсоров магнитного поля, основанных на новых физических технологиях, которые приходят постепенно на смену датчикам Холла.



Р. Б. МОРГУНОВ, О. В. КОПЛАК, А. Д. ТАЛАНЦЕВ,  
О. С. ДМИТРИЕВ, А. И. БЕЗВЕРХНИЙ

## МАГНИТНАЯ РЕЛАКСАЦИЯ В УСТРОЙСТВАХ СПИНОВОЙ ЭЛЕКТРОНИКИ



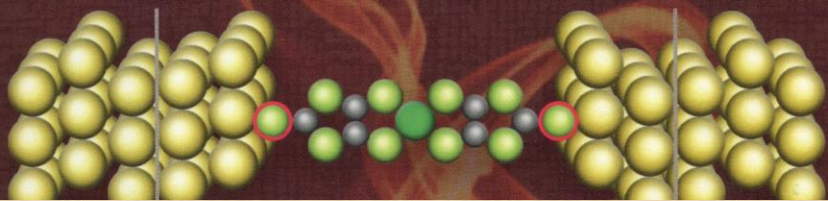
Тамбов  
Издательский центр ФГБОУ ВО «ТГТУ»  
2019

К  
Н  
И  
Г  
И

A999235

В. А. СТАРОДУБ  
Т. Н. СТАРОДУБ  
О. Н. КАЖЕВА  
В. И. БРЕГАДЗЕ

# МАТЕРИАЛЫ СОВРЕМЕННОЙ ЭЛЕКТРОНИКИ И СПИНТРОНИКИ



A999234, A999235

Материалы современной электроники и спинтроники / В. А. Стародуб [и др.]. – Москва : Физматлит, 2018. – 424 с. : ил. – Библиогр. в конце разд. – ISBN 978-5-9221-1825-5. – Текст : непосредственный. Монография посвящена возникшему в конце 60-х – начале 70-х гг. XX в. направлению физики и химии твёрдого тела – физикохимии низкоразмерных проводящих твёрдых тел, достигшей к настоящему времени высокого уровня развития, что позволяет широко использовать подобные объекты в микро- и нанoeлектронике и спинтронике. Обсуждаются материалы современной электроники и спинтроники — неорганические и комплексные соединения, органические соединения, органические и неорганические полимеры.

УЧЕБНИК ДЛЯ ВЫСШЕЙ ШКОЛЫ

В. Е. Борисенко, А. Л. Данилюк, Д. Б. Мигас

## СПИНТРОНИКА



Борисенко, В. Е. Спинтроника : учебное пособие / В. Е. Борисенко, А. Л. Данилюк, Д. Б. Мигас. – Москва : Лаборатория знаний, 2017. – 232 с. : ил., схем., табл. – (Учебник для высшей школы). – Режим доступа: по подписке. – URL: <https://biblioclub.ru/index.php?page=book&id=471115> (дата обращения: 17.02.2021). – Библиогр. в кн. – ISBN 978-5-00101-538-3 (эл.). – ISBN 978-5-906828-49-1 (печат. изд.). – Текст : электронный.

В данном учебном пособии обобщены теоретические представления и фундаментальные закономерности явлений, лежащих в основе спинтроники. Также рассмотрены принципы функционирования и конструкции спинтронных элементов и систем для обработки информации.

Claudia Felser  
Gerhard H. Fecher *Editors*

# Spintronics

From Materials to Devices

Felser, C. Spintronics: From Materials to Devices / Claudia Felser, Gerhard H. Fecher. – DOI: <https://doi.org/10.1007/978-90-481-3832-6>. – Текст : электронный // Information Springer Science+Business Media. – Dordrecht, 2013. – URL: <https://link.springer.com/book/10.1007/978-90-481-3832-6> (дата обращения: 17.02.2021). – Режим доступа: по подписке СГУ. – ISBN 978-90-481-3831-9 (Print). – ISBN 978-90-481-3832-6 (Online).

 Springer

Springer Theses  
Recognizing Outstanding Ph.D. Research

Marta Galbiati

# Molecular Spintronics

From Organic Semiconductors  
to Self-Assembled Monolayers

Galbiati, M. Molecular Spintronics / Marta Galbiati. – DOI: <https://doi.org/10.1007/978-3-319-22611-8>. – Текст : электронный // Organic Semiconductors to Self-Assembled Monolayers / Information Springer International Publishing Switzerland, 2016. – URL: <https://link.springer.com/book/10.1007/978-3-319-22611-8> (дата обращения: 17.02.2021). – Режим доступа: по подписке СГУ. – ISBN 978-3-319-22610-1(Print). – ISBN 978-3-319-22611-8 (Online).

 Springer



# НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКАЯ ИНФОРМАЦИЯ



СЕРИЯ 1

## Организация и методика информационной работы

Буйлова, Н. М. О рубрикации раздела "Спинтроника" в выпуске РЖ ВИНТИ РАН «Физика твердых тел (электрические свойства)» / Н. М. Буйлова, В. Г. Шамаев, Э. М. Эпштейн. — Текст : непосредственный // Научно-техническая информация. Сер. 1, Организация и методика информационной работы. — 2008. — № 1. — С. 28-29. — Библиогр.: с. 29 (4 назв.). — ISSN 0548-0019.

### ОБЩИЙ РАЗДЕЛ

Семенов Э. П. Информатика и духовные ценности: эпоха глобализации . . . . .	1
Плешкевич Е. А. К вопросу об использовании понятия прерывности в документационной науке . . . . .	11

### НАМ ПИШУТ

Московкин В. М., Савченко Е. М. Два пути «интернетизации» научных исследований в условиях глобализации . . . . .	16
--	----

### ОРГАНИЗАЦИЯ ИНФОРМАЦИОННОЙ РАБОТЫ

Савин А. Н. Разработка единого информационно-технологического комплекса регионов, ориентированного на системные приоритеты инновационного развития пользователей . . . . .	19
Егоров В. С., Чернобровская Т. Н. Автоматизированное определение тематики публикаций при библиографической обработке первоисточников . . . . .	25

### ДОКУМЕНТАЛЬНЫЕ ИСТОЧНИКИ ИНФОРМАЦИИ

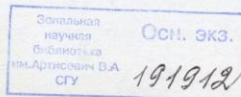
Буйлова Н. М., Шамаев В. Г., Эпштейн Э. М. О рубрикации раздела «Спинтроника» в выпуске РЖ ВИНТИ РАН «Физика твердых тел (Электрические свойства)» . . . . .	28
--	----

### СПРАВОЧНО-ИНФОРМАЦИОННЫЙ РАЗДЕЛ

Галенко В. Т. System in pinyin. Международная форма представления географических названий Китая кириллицей . . . . .	30
--	----

№1

2008



## ДОКУМЕНТАЛЬНЫЕ ИСТОЧНИКИ ИНФОРМАЦИИ

УДК [(051.6)ВИНИТИ:53]:004

Н. М. Буйлова, В. Г. Шамаев, Э. М. Эпштейн

### О рубрикации раздела "Спинтроника" в выпуске РЖ ВИНТИ РАН "Физика твердых тел (электрические свойства)"

*Обосновывается необходимость издания отдельного выпуска реферативного журнала по спинтронике — новой, бурно развивающейся области физики. Интерес к спинтронике, изучающей фундаментальные процессы одновременного переноса в твердом теле как заряда электронов, так и их спинов, а также взаимодействия электронов с магнитной решеткой, определяется не только зачатывающими перспективами, но и уже сегодня достигнутыми результатами. Спиновая и зарядовая «степени свободы» открывают возможности создания полупроводниковых приборов с параметрами, во много раз превосходящими существующие, а также и конструирование приборов, не имеющих в настоящее время аналогов. В первую очередь, это позволит по-новому решать задачи передачи и обработки информации.*

*Излагается подробная рубрикация по спинтронике для обсуждения возможности издания отдельного выпуска реферативного журнала.*

Спинтроника (спиновая электроника) — это новая область физики, которая занимается исследованием фундаментальных процессов одновременного переноса в твердом теле как заряда электронов, так и их спинов, а также взаимодействия электронов с магнитной решеткой.

Интерес к этой области определяется захватывающими перспективами и уже достигнутыми результатами [1, 2]. В первую очередь, это относится к решению задач передачи и обработки информации. Использование «двух степеней свободы» — спиновой и зарядовой — открывает возможность создания полупроводниковых приборов с параметрами, многократно превосходящими существующие, а также приборов, не имеющих в настоящее время аналогов.

Несомненным показателем признания важности данного направления является присуждение Нобелевской премии по физике за 2007 г. французскому теоретику А. Ферту и немецкому экспериментатору П. Грюнбергу за открытие эффекта гигантского магнитосопротивления.

Среди достижений спинтроники можно отметить:

- создание и эксплуатацию низкотемпературных элементов магниторезистивной памяти;
- получение ферромагнитных полупроводников с температурой Кюри существенно выше комнатной;
- открытие новых спиновых инжекторов.

В настоящее время активные исследования в области спинтроники ведутся в ряде институтов РАН — Институте радиотехники и электроники, Физико-техническом институте, Институте общей

физики, Институте микроструктур, Институте физики металлов, Институте проблем управления, Казанском физико-техническом институте, а также в МГУ им. М. В. Ломоносова и ряде других вузов.

Зарубежная география работ в этой области весьма обширна — от Японии до Португалии и от Канады до Бразилии. Как следствие этого, статьи, относящиеся к данной области, появляются в самых разных журналах, что в определенной мере затрудняет своевременное ознакомление с новой информацией. Однако отдельного раздела по спинтронике в Реферативном журнале ВИНТИ РАН «Физика» нет, и статьи по спинтронике разбросаны по нескольким выпускам и разделам РЖ.

Для исправления такого положения в выпуске РЖ «Электрические свойства твердых тел» вводится новый раздел «Спинтроника». В дальнейшем в рамках информационных изданий ВИНТИ РАН предполагается издавать отдельный выпуск РЖ, посвященный этой тематике. РЖ под названием «Спинтроника» будет издаваться как в традиционной печатной форме по технологии подготовки единой технологической базы данных [3], так и в электронном виде — по технологии подготовки электронного РЖ по физико-математическим наукам [4].

Цель настоящей работы — изложение подробной рубрикации по спинтронике, которая поможет классифицировать публикации по этой тематике. Предлагаемая рубрикация по существу состоит из четырех больших разделов:

1. Материалы, технология и структуры спинтроники.
2. Основные эффекты спинтроники.
3. Экспериментальные методы.
4. Приборы спиновой электроники.

# ДОКУМЕНТАЛЬНЫЕ ИСТОЧНИКИ ИНФОРМАЦИИ

УДК [(051.6)ВИНИТИ:53]:004

Н. М. Буйлова, В. Г. Шамаев, Э. М. Эпштейн

## О рубрикации раздела “Спинтроника” в выпуске РЖ ВИНТИ РАН “Физика твердых тел (электрические свойства)”

*Обосновывается необходимость издания отдельного выпуска реферативного журнала по спинтронике — новой, бурно развивающейся области физики. Интерес к спинтронике, изучающей фундаментальные процессы одновременного переноса в твердом теле как заряда электронов, так и их спинов, а также взаимодействие электронов с магнитной решеткой, определяется не только заветными перспективами, но и уже сегодня достигнутыми результатами. Спиновая и зарядовая “степени свободы” открывают возможности создания полупроводниковых приборов с параметрами, во много раз превосходящими существующие, а также и конструирование приборов, не имеющих в настоящее время аналогов. В первую очередь, это позволит по-новому решать задачи передачи и обработки информации. Излагается подробная рубрикация по спинтронике для обсуждения возможности издания отдельного выпуска реферативного журнала.*

Спинтроника (спиновая электроника) — это новая область физики, которая занимается исследованием фундаментальных процессов одновременного переноса в твердом теле как заряда электронов, так и их спинов, а также взаимодействия электронов с магнитной решеткой.

Интерес к этой области определяется захватывающими перспективами и уже достигнутыми результатами [1, 2]. В первую очередь, это относится к решению задач передачи и обработки информации. Использование “двух степеней свободы” — спиновой и зарядовой — открывает возможность создания полупроводниковых приборов с параметрами, многократно превосходящими существующие, а также приборов, не имеющих в настоящее время аналогов.

Несомненным показателем признания важности данного направления является присуждение Нобелевской премии по физике за 2007 г. французскому теоретику А. Ферту и немецкому экспериментатору П. Грюнбергу за открытие эффекта гигантского магнитосопротивления.

Среди достижений спинтроники можно отметить:

- создание и эксплуатацию низкотемпературных элементов магниторезистивной памяти;
- получение ферромагнитных полупроводников с температурой Кюри существенно выше комнатной;
- открытие новых спиновых инжекторов.

В настоящее время активные исследования в области спинтроники ведутся в ряде институтов РАН — Институте радиотехники и электроники, Физико-техническом институте, Институте общей

физики, Институте микроструктур, Институте физики металлов, Институте проблем управления, Казанском физико-техническом институте, а также в МГУ им. М. В. Ломоносова и ряде других вузов.

Зарубежная география работ в этой области весьма обширна — от Японии до Португалии и от Канады до Бразилии. Как следствие этого, статьи, относящиеся к данной области, появляются в самых разных журналах, что в определенной мере затрудняет своевременное ознакомление с новой информацией. Однако отдельного раздела по спинтронике в Реферативном журнале ВИНТИ РАН “Физика” нет, и статьи по спинтронике разбросаны по нескольким выпускам и разделам РЖ.

Для исправления такого положения в выпуске РЖ “Электрические свойства твердых тел” вводится новый раздел “Спинтроника”. В дальнейшем в рамках информационных изданий ВИНТИ РАН предполагается издавать отдельный выпуск РЖ, посвященный этой тематике. РЖ под названием “Спинтроника” будет издаваться как в традиционной печатной форме по технологии подготовки единой технологической базы данных [3], так и в электронном виде — по технологии подготовки электронного РЖ по физико-математическим наукам [4].

Цель настоящей работы — изложение подробной рубрикации по спинтронике, которая поможет классифицировать публикации по этой тематике.

Предлагаемая рубрикация по существу состоит из четырех больших разделов:

1. Материалы, технология и структуры спинтроники.
2. Основные эффекты спинтроники.
3. Экспериментальные методы.
4. Приборы спиновой электроники.

В каждом из разделов имеется подробная рубрикация содержания. В представленном виде рубрикация отражает все направления развития спинтроники.

### Спинтроника

#### Общие вопросы

#### Обзоры

**Материалы спинтроники (Materials for spintronics), технология материалов спинтроники (Spintronic materials technology) и структуры спинтроники (Spintronic structures).**

- Ферромагнитные металлы (Ferromagnetic metals)
- Разбавленные магнитные полупроводники (Diluted magnetic semiconductors)
- Половинные металлы (Half-metals)
- Манганиты (Manganites)
- Молекулярные магниты (Molecular magnets)
- Изолирующие материалы для барьерных слоев (Insulators for barrier layers)
- Технология материалов спинтроники (Spintronics materials technology)
- Структуры спинтроники (Spintronics structures)
- Многослойные структуры (Multilayer structures)
- Обменно-смещенные переходы (Exchange-biased transitions)
- Магнитные сверхрешетки (Magnetic superlattices)
- Спиновые вентили (Spin valves)
- Наностолбики (Nanopillars)
- Наносужения (Nanostriations)
- Магнитные туннельные переходы (Magnetic tunneling junctions)
- Переходы ферромагнетик — сверхпроводник (Ferromagnet — superconductor junctions)

#### Основные эффекты спинтроники (Main spintronic effects)

- Анизотропное магнитосопротивление (Anisotropic magnetoresistance)
- Баллистическое магнитосопротивление (Ballistic magnetoresistance)
- Туннельное магнитосопротивление (Tunnel magnetoresistance)
- Гигантское магнитосопротивление (Giant magnetoresistance)
- Колоссальное магнитосопротивление (Colossal magnetoresistance)
- Спин-поляризованный перенос в металлах (Spin-polarized transport in metals)
- Спин-поляризованный перенос в полупроводниках (Spin-polarized transport in semiconductors)
- Релаксация и рассеяние спинов (Spin relaxation and scattering)
- Дрейф и диффузия спинов (Spin drift and diffusion)
- Спиновая инжекция (аккумуляция) (Spin injection (accumulation))
- Перенос спинового крутильного момента током (Spin torque transfer)
- Переключение магнитных структур (Switching magnetic structures)
- Увлечение доменных стенок током (Domain wall transport by current)
- Генерация спиновых волн (Spin wave generation)

- Спин-волновой резонанс (Spin wave resonance)
- Резонансное туннелирование в магнитных структурах (Resonance tunneling in magnetic structures)
- Аномальный эффект Холла (Extraordinary Hall effect)
- Планарный эффект Холла (Planar Hall effect)
- Спиновый эффект Холла (Spin Hall effect)
- Оптическая ориентация спинов (Optical spin orientation)
- Спиновая кулоновская блокада (Spin Coulomb blockade)

#### Экспериментальные методы (Experimental methods)

- Крутильная магнитометрия (Rotational magnetometry)
- Вибрационная магнитометрия (Vibrational magnetometry)
- Электронная микроскопия (Electron microscopy)
- Холловская магнитометрия (Hall-effect magnetometry)
- Туннельная спектроскопия (Tunneling spectroscopy)
- Туннельная микроскопия (Tunneling microscopy)
- Атомно-силовая микроскопия (Atomic force microscopy)
- Магнито-силовая микроскопия (Magnetic force microscopy)
- Спектроскопия рентгеновского магнитного кругового дихроизма (X-ray magnetic circular dichroism spectroscopy)
- Фотоэлектронная спектроскопия (Photoelectron spectroscopy)
- Рентгеновская дифрактометрия (X-ray diffractometry)
- Нейтронная дифрактометрия (Neutron diffractometry)
- Оптическая магнитометрия (Optical magnetometry)

#### Приборы спиновой электроники (Spin electron devices)

- Спиновые диоды (Spin diodes)
- Спиновые транзисторы (Spin transistors)
- Спиновые фильтры (Spin filters)
- Запоминающие устройства (Memory devices)
- Спиновые квантовые компьютеры (Spin quantum computers)

Спинтроника — новая, быстро развивающаяся область науки, поэтому представленная рубрикация в дальнейшем может претерпеть изменения.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Гуляев Ю. В., Зильберман П. Е., Эпштейн Э. М. Как ток спины переносит. Спинтроника многослойных ферромагнетиков // Природа. — 2007. — № 5. — С. 20–27.
2. Бороухович А. С. Материалы и структуры полупроводниковой спиновой электроники // Перспективные материалы. — 2006. — № 4. — С. 23–31.
3. Шамаев В. Г., Жаров А. В., Горшков А. В. Единая технологическая база данных для подготовки информационных продуктов ВИНТИ // НТИ. Сер. 1. — 2006. — № 5. — С. 10–15.
4. Шамаев В. Г., Жаров А. В. Электронный реферативный журнал ВИНТИ по физико-математическим наукам // НТИ. Сер. 1. — 2006. — № 3. — С. 15–25.

Материал поступил в редакцию 19.07.07.

ежемесячный научно-информационный журнал

SCIENTIFIC  
AMERICAN

# В мире науки

№01 2008

502  
933

Алмазы для  
спинтроники

## БУДУЩЕЕ КОСМИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ

Что такое  
сознание?

Лаборатория в чипе

Экспериментальные  
лекарства: правда  
или вымысел?

Новый взгляд  
на охрану  
природы



www.sciam.ru

Ошалом, Д. Алмазы для спинтроники : [новое применение алмазам] / Дэвид Ошалом, Рональд Хэнсон, Райан Эпстейн ; перевод Б. А. Квасова. – Текст : непосредственный // В мире науки. – 2008. – № 1. – С. 54-61 : 2 рис., 9 граф., 1 схем, 1 фот. – Библиогр.: с. 61 (3 назв.). – ISSN 0208-0621.

Дэвид Ошалом, Рональд Хэнсон и Райан Эпстейн



## алмазы для спинтроники

**А**лмаз обладает целым рядом уникальных свойств: сверхтвердостью, самой высокой теплопроводностью и прозрачностью для ультрафиолетового света. Уже разработаны методы выращивания высокочистых монокристаллов синтетических алмазов с введением нужных примесей (легированием), что делает их весьма перспективным материалом для использования в электронике. Чистый алмаз — диэлектрик, но после легирования он может стать полупроводником с исключительно полезными свойствами. Его можно использовать для изготовления ультрафиолетовых светодиодов и оптики, а также в мощной микроволновой электронике. Но есть одна область применения алмаза — квантовая спинтроника. Результатом исследований в этой области может стать создание квантового компьютера, способного решать задачи, непосильные для обычных компьютеров.

Спинтроника — новейшее направление электроники, в котором рассматривается не только электрический заряд электронов (как в обычной электронике), но и спин — свойство, благодаря которому электроны ведут себя как крошечные стержневые магниты. Ваш компьютер, возможно, уже содержит первое и самое простое спинтронное устройство: с 1998 г. в считывающих головках накопителей на жестких дисках используется эффект так называемого гигантского магнитосопротивления, позволяющий обнаруживать микроскопические магнитные домены на диске, хранящие единицы и нули данных.

Еще одно спинтронное устройство, которое появится в компьютерах в недалеком будущем, — магниторезистивная память с произвольным доступом (MRAM). Как и в накопителях на жестких дисках, MRAM хранит информацию как намагничивание и поэтому энергонезависима (т.е. данные в ней не теряются при выключении питания уст-

ройства). Считывание производится электрическим путем, точно так же, как в любых других накопителях с хранением заряда. Благодаря *FreeScale Semiconductor*, отделению фирмы *Motorola*, в 2006 г. в продажу поступили первые MRAM.

Использование в компьютерах энергонезависимых чипов памяти поможет избежать трудоемкой перезагрузки программ с жесткого диска при каждом включении. Через доли секунды компьютер с чипом может продолжить работу с того места, на котором его прервали (подобно современным карманным компьютерам), т.к. все необходимые программы и данные будут сохраняться в чипе.

Более продвинутые методы спинтроники, которые находятся на ранних стадиях исследования, например «спиновые» транзисторы, использующие спин для управления током, можно было бы применить при создании компьютерных микросхем с динамическим изменением конфигурации логических схем.

С  
Т  
А  
Т  
Ь  
И

С  
Т  
А  
Т  
Ь  
И

СПЕЦИАЛЬНЫЙ  
РЕПОРТАЖ502  
933

— БУДУЩЕЕ МЕДИЦИНЫ —

31 ИЮЛ 2018

АТ И НОВАЯ ЭРА ИНФЕКЦИОННЫХ НЕДУГОВ

# В мире науки

SCIENTIFIC  
AMERICANЕжемесячный  
научно-информационный  
журнал

www.sci-ru.org

7 2018

12+

## КАК ДИНОЗАВРЫ ПОЙМАЛИ УДАЧУ

Миллионы лет они ютились  
в нескольких уголках Земли,  
пока однажды не наступил  
переломный момент

ПЛЮС

### НА ПОЛПУТИ К ЗВЕЗДАМ

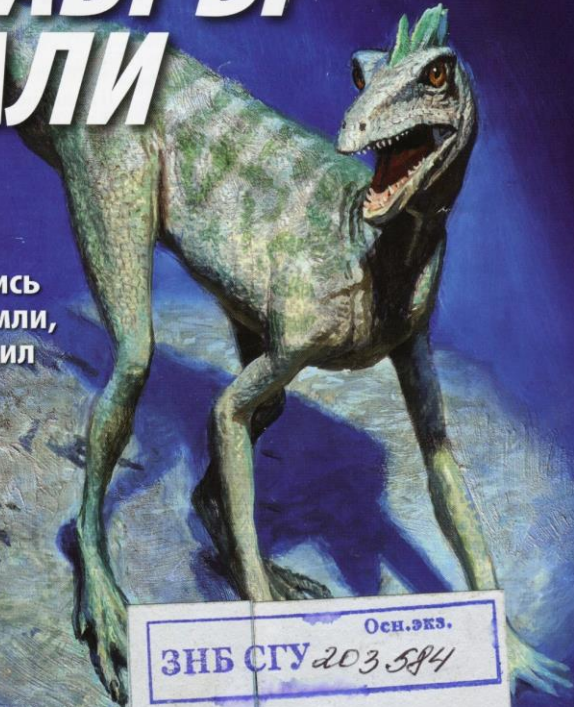
Достижения российских  
астрофизиков

### МНОГОЛИКАЯ АСТРОНОМИЯ

Гравитационные волны и световые частицы  
на службе у исследователей космоса

### НАША СОБСТВЕННОСТЬ И МЫ

Как возникает привязанность к вещам



Сторчак, В. Г. Магнитный силицен - материал электроники будущего : интервью / В. Г. Сторчак ; беседовала Н. Лескова. - Текст : непосредственный // В мире науки. - 2018. - № 7. - С. 102-107 : 3 фот., 1 табл. - ISSN 0208-0621.

# МАГНИТНЫЙ СИЛИЦЕН —

материал электроники будущего

100 лет назад рассуждения К.Э. Циолковского о будущих космических полетах казались абсолютной фантастикой. 30 лет назад никто из нас не мог себе представить, что шариковые ручки станут анахронизмом и им на смену придут разнообразные гаджеты, с помощью которых можно не только писать, но и делать многое другое. 20 лет назад мобильные телефоны были привилегией избранных — большие, тяжелые, далеко не каждому по карману. Остальные пользовались пейджерами — многие ли сегодня помнят, что это такое? Информационные технологии развиваются столь быстрыми темпами, что человечество не всегда успевает на эти изменения реагировать. Пройдет еще каких-нибудь десять лет — и мир может измениться до неузнаваемости. Все это — во многом благодаря новым материалам с принципиально новыми свойствами.



Российская  
академия наук

8 АВГ 2008

ISSN 0002—3353

# Известия Академии наук

Серия  
химическая

Зональная  
ислужба  
библиотечка  
им. Артемьевич В.А.  
СГУ 192244

Осн. экз.

2008

4

стр. 673–862

ISSN 0002-3353 Известия Академии наук. Серия химическая, 2008, № 4

673

Минкин, В. И. Бистабильные органические, металлоорганические и координационные соединения для молекулярной электроники и спинтроники / В. И. Минкин. – Текст : непосредственный // Известия Академии наук. Серия химическая. – 2008. – № 4. – С. 673-703 : 33 рис. – Библиогр.: с. 702-703 (95 назв.). – ISSN 0002-3353.

## Обзоры

УДК 54+547.62+541.18

### Бистабильные органические, металлоорганические и координационные соединения для молекулярной электроники и спинтроники\*

В. И. Минкин

Научно-исследовательский институт физической и органической химии  
Южного федерального университета,  
Российская Федерация, 344090 Ростов-на-Дону, просп. Стачки 194/2.  
Факс: (863) 243 4700. E-mail: minkin@ipoc.rsu.ru

Рассмотрены достижения молекулярной электроники и спинтроники в области, связанной с созданием элементной базы молекулярного компьютера (молекулярных переключателей, оптической, редокс-, магнитной молекулярной памяти и электропроводящих молекулярных материалов).

**Ключевые слова:** молекулярная электроника, молекулярные переключатели, молекулярные провода, молекулярные магнетики, спинтроника, трехмерная память, фотохромизм.

#### 1. Молекулярная электроника

Предположения о том, что молекулы могут обладать способностью проводить электрический ток, высказывали Малликен и Сент-Дьерди еще в 1950-е гг. XX в., но обычно возникновение молекулярной электроники принято связывать с опубликованием в 1974 г. работы<sup>1</sup>, в которой была выдвинута идея молекулярного выпрямителя (диола) — молекулы, моделирующей *p-n*-переход в полупроводниках. Чтобы молекула обладала необходимыми свойствами, она должна содержать мощные  $\pi$ -донорные и  $\pi$ -акцепторные группы, разделенные блокирующим сопряжением сигма-спейсером. Авторами<sup>1</sup> была предложена структура I (рис. 1).

\* По материалам пленарного доклада на XVIII Менделеевском съезде, Москва, 2007.

В настоящее время молекулярная электроника превратилась в широко разветвленную мультидисциплинарную область исследований, охватывающую создание и применение молекулярных устройств в качестве диэлектриков, переключателей тока, транзисторов, светонизлучающих диодов, сенсоров и др.<sup>2–5</sup> В широком смысле молекулярную электронику можно определить как область применения молекул и молекулярных материалов, способных принимать, хранить и обрабатывать информацию. Создание широкого спектра переключателей и нанопроводников обеспечило возможность формирования на их основе молекулярных логических устройств. Такое гибридное устройство было создано в лабораториях фирмы «Hewlett—Packard» (США)<sup>6</sup>. Оно состоит из демультископера, позволяющего с помощью нескольких (*k*) обычных проводников на кристалле кремния управлять  $2^k$  нанопроводниками, и ключа, содержащего

Малинецкий, Г. Г. Самоорганизация в сложных системах и новые проблемы теории измерений / Г. Г. Малинецкий, Т. С. Ахромеева. – Текст : непосредственный // Измерительная техника. – 2016. – № 6. – С. 18-22 : 2 рис. – Библиогр.: с. 22 (9 назв.). – ISSN 0368-1025.

# ИЗМЕРИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА 2016 июнь № 6

ЗНБ СГУ 202320

Предлагаем вниманию читателей подборку статей по материалам XIII Всероссийской научно-технической конференции «Состояние и проблемы измерений», прошедшей в МГТУ им. Н. Э. Баумана 22–24 апреля 2015 г. Тематика конференции представлена следующими научными направлениями: фундаментальные проблемы физики, метрологии и теории измерений; квантовая метрология и нанометрология; измерения линейных и угловых величин, времени, частоты и их технические приложения; метрологическое обеспечение качества продукции; информационно-метрологическое сопровождение жизненного цикла функционирующих машин и механизмов; измерения в психологии и медико-биологических исследованиях; проблемы метрологии в учебном процессе.

В работе конференции приняли участие представители академической, вузовской, отраслевой науки и промышленности. С докладами выступили и выдающиеся учёные, известные на всю страну, и аспиранты, студенты, делающие в науке первые шаги.

519.7

## Самоорганизация в сложных системах и новые проблемы теории измерений

Г. Г. МАЛИНЕЦКИЙ, Т. С. АХРОМЕЕВА

Институт прикладной математики им. М. В. Келдыша РАН, Москва, Россия,  
e-mail: GMalin@Keldysh.ru

Рассмотрены проблемы теории измерений, в решении которых принципиальную роль могут сыграть представления и модели теории самоорганизации. Особое внимание обращено на квантовые измерения в простейших системах спинтроники.

**Ключевые слова:** сложные системы, самоорганизация, квантовые измерения.

Some new problems of measurement theory where concepts and models of synergetics can play important role are discussed. Special attention is paid to measurement in quantum, systems.

**Key words:** measurement problem, complex systems, self-organization, quantum measurement, swarms and commands.

В настоящее время в науке и различных технологиях сделан важнейший шаг, который изменит постановку многих задач теории измерений. Этот шаг связан с переходом от анализа к синтезу, от изучения отдельных фрагментов некоторых объектов к исследованию целостных систем. В современных технологиях всё шире используется самоорганизация в различных масштабах, вплоть до атомного, применяются междисциплинарные подходы. При этом измерения рассматриваются не отдельно, а в контексте всей решаемой задачи. Специалисты по философии науки и техники и методологи заинтересовались этим вопросом и начали развивать представления о научной рациональности, выделив три этапа её развития: классический, не- и постнеклассический [1].

В отношении измерений можно сказать, что в классической рациональности объяснение и исследование сосредоточено только на объекте, а всё, что относится к субъекту, средствам и операциям деятельности, исключается. При-

меры — классическая механика, электродинамика, гидродинамика и многие другие теории, в которых при исправных приборах всегда должно получаться одно и то же число, являющееся ответом на поставленную задачу.

В неклассическом варианте прослеживается связь между знаниями об объекте и характером используемых средств и операций деятельности. Действительно, в теории относительности множество сущностей, связанных с пространством и временем, изменяются в зависимости от того, в какой инерциальной системе проводятся измерения. В квантовой механике процедура измерений может повлиять на состояние объекта. В хрестоматийном эксперименте с дифракцией электрона на двух щелях картина кардинально изменяется в зависимости от фиксации щели, через которую прошёл электрон.

В постнеклассической рациональности учтены соотношения знаний, полученных об объекте, не только с особенностями средств и операций деятельности, но и с постав-

53  
242

7 НОЯ 2012

ИНЖЕНЕРНАЯ 10/2012

ФИЗИКА

ISSN: 2072-9995



Звездин, К. А. Спиновый транспорт и перспектива спинтронных наноосцилляторов / К. А. Звездин, М. Ю. Чиненков, А. Ф. Попков, Н. А. Дюжев, А. К. Звездин. – Текст : непосредственный // Инженерная физика. – 2012. – № 10. – С. 27-44 : 21 рис., 2 табл. – Биб-лиогр.: с. 41-44 (43 назв.). – ISSN 2072-9995.

● ФИЗИКА АТОМНОГО ЯДРА  
И ЭЛЕМЕНТАРНЫХ ЧАСТИЦ

● ЭЛЕКТРОДИНАМИКА

● ФИЗИКА ТВЕРДОГО ТЕЛА

● НАНОМАТЕРИАЛЫ  
И НАНОТЕХНОЛОГИИ

● ГЕОФИЗИКА

ЗНБ СГУ

Осн.экз.

198 455

## НАНОМАТЕРИАЛЫ И НАНОТЕХНОЛОГИИ

<sup>1)</sup> К.А. ЗВЕЗДИН, <sup>2),3)</sup> М.Ю. ЧИНЕНКОВ,  
<sup>1),2)</sup> А.Ф. ПОПКОВ, <sup>2),3)</sup> Н.А. ДЮЖЕВ, <sup>1)</sup> А.К. ЗВЕЗДИН

<sup>1)</sup> Институт общей физики им. А.М. Прохорова РАН, ул. Вавилова 38, Москва, 119991

<sup>2)</sup> Национальный исследовательский университет МИЭТ, Москва, 124498

<sup>3)</sup> ЗАО «Зеленоградский нанотехнологический центр» (ЗАО «ЗНТЦ»), Москва, 124498

### СПИНОВЫЙ ТРАНСПОРТ И ПЕРСПЕКТИВА СПИНТРОННЫХ НАНООСЦИЛЛЯТОРОВ

*Эта статья представляет собой вторую часть обзора, посвященного проблемам переноса спинового момента и его практическим применениям в нанoeлектронике. В первой части обзора [1] рассмотрены физические основы этого нового физического процесса и его приложения для развития магнитной оперативной памяти. Настоящая статья посвящена вопросам, связанным с генерацией автоколебаний в магнитных наноструктурах под действием спин-поляризованного тока, и основанном на этом эффекте спин-трансферным наноразмерным осцилляторам. Ширина линии однородной осцилляции остается проблемой. В настоящее время разрабатываются вихревые наногенераторы. Они обладают значительно более узкой линией и более высокой мощностью.*

<sup>1)</sup> K.A. ZVEZDIN, <sup>2),3)</sup> M.Yu. CHINENKOV,  
<sup>1),2)</sup> A.F. POPKOV, <sup>2),3)</sup> N.A. DYUZHEV, <sup>1)</sup> A.K. ZVEZDIN

<sup>1)</sup> Prokhorov's General Physics Institute of RAS, Vavilov Street 38, Moscow, 119991

<sup>2)</sup> National Research University of Electronic Technology MIET, Moscow, 124498

<sup>3)</sup> JSC «Zelenograd nanotechnology center», Moscow, 124498

### SPIN TRANSPORT AND THE POSSIBILITIES OF SPIN NANOOSCILLATORS

*This article is the second part of the review on the problems of spin transfer and its practical applications in nanoelectronics. In the first part of the review [1] the physical basis of this new physical process and its application for the development of magnetic memory are discussed. This paper is devoted to issues related to the generation of autooscillations in magnetic nanostructures under the influence of spin-polarized current and based on this effect the spin-transfer nanooscillators. The line width of homogeneous oscillations remains a problem. Being developed vortex nanogenerators. They have a much more narrow line and higher power.*

**Ключевые слова:** спиновый транспорт, спинтронный наногенератор, спин-вентильная наноструктура, магнитодинамика.

**Key words:** spin-polarized transport, spintronic nanogenerator, spin-valve nanostructure, magnetodynamics.



# МИКРОЭЛЕКТРОНИКА



<http://www.naukaran.ru>  
<http://www.maik.ru>

Трушин, О. С. Комплекс программ микромагнитного моделирования MICROMAG и его использование для исследования элементов спинтроники / О. С. Трушин, Н. Барабанова. – Текст : непосредственный // Микроэлектроника. – 2013. – Т. 42, № 3. – С. 218-226 : 5 рис. – Библиогр.: с. 226 (9 назв.). – Имеется электронная версия печатной публикации. – URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=18901220> (дата обращения: 10.02.2021). – Режим доступа: свободный. – ISSN 0544-1269.



“НАУКА”

Осн. экз.  
ЗНБ СГУ 199623

## КОМПЛЕКС ПРОГРАММ МИКРОМАГНИТНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ MICROMAG И ЕГО ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ЭЛЕМЕНТОВ СПИНТРОНИКИ

© 2013 г. О. С. Трушин<sup>1</sup>, Н. Барабанова<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Ярославский филиал Физико-технологического института Российской АН

<sup>2</sup>Ярославский государственный университет

E-mail: otrushin@gmail.com

Поступила в редакцию 12.09.2012 г.

Представлен простой в реализации и эффективный программный комплекс микромагнитного моделирования MICROMAG, предназначенный для исследования процессов переключения магнитных наноструктур. Данный комплекс протестирован путем сравнения с результатами других известных программ. С его помощью исследовано влияние технологических дефектов на магнитные характеристики спин-вентильных структур.

DOI: 10.7868/S0544126913030071

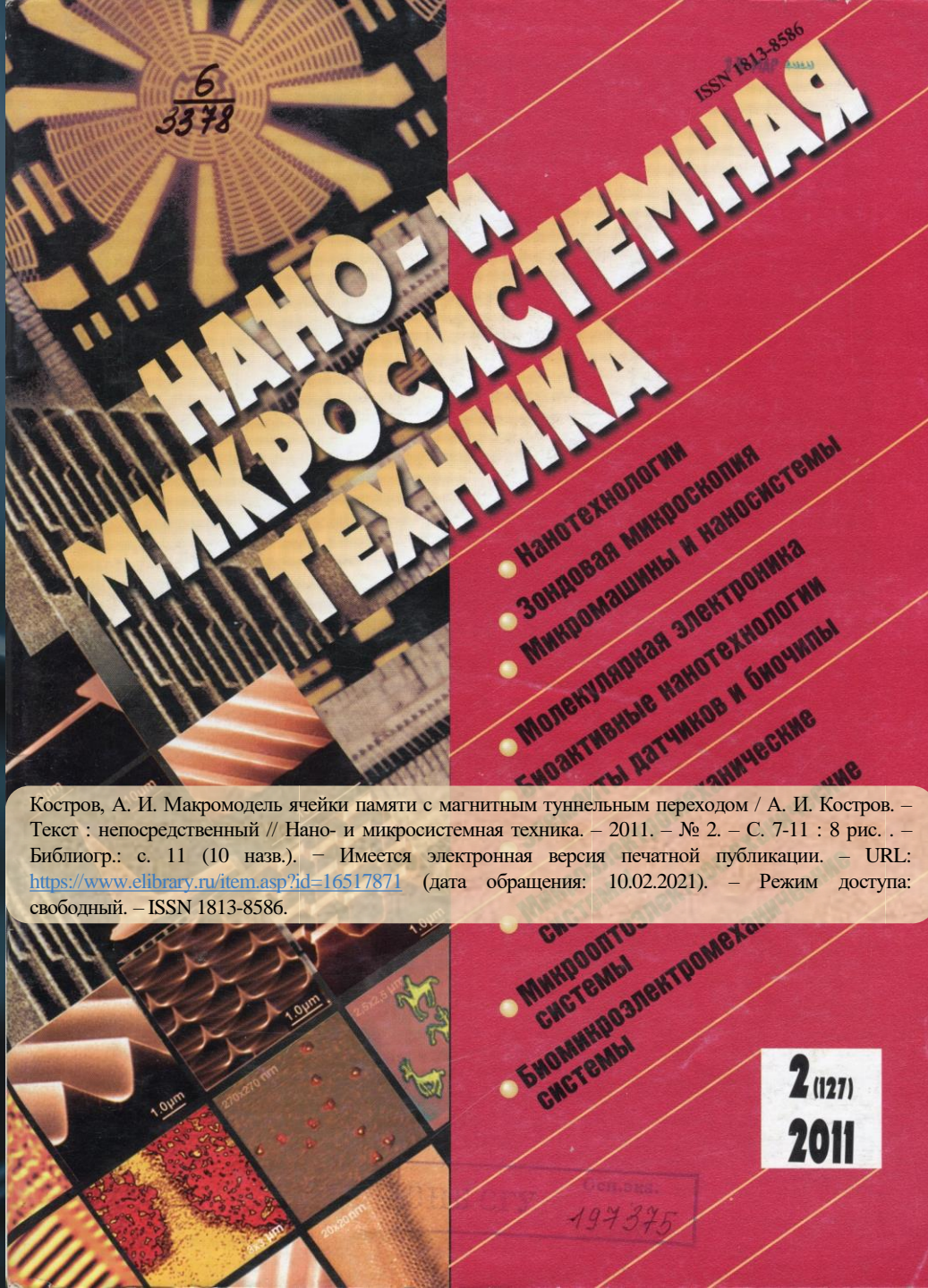
### ВВЕДЕНИЕ

Спинтроника представляет собой новую парадигму в цифровой технике, где вместо заряда электрона, в качестве носителя информации выступает спин. Важнейшее направление спинтроники связано с использованием многослойных магнитных наноструктур, в которых наблюдается эффект Гигантского Магнетосопротивления (ГМС). В настоящее время спинтроника уже стала технологической реальностью, так как многие ее применения (такие как устройства чтения информации на жестких дисках и микросхемы MRAM) вошли в повседневную жизнь. Развитие микросхем быстрой магнитной памяти MRAM обещает произвести настоящую революцию в мире компьютерной техники, так как этот вид памяти может заменить как постоянную память (жесткий диск), так и оперативную память (DRAM), тем самым, обеспечив существенное ускорение работы компьютера. Однако современные технологии MRAM, пока не обеспечивают в должной мере конкурентные преимущества по сравнению с альтернативными технологиями компьютерной памяти (DRAM, SRAM), что сдерживает широкое внедрение MRAM на рынке. В настоящее время MRAM является “нишевой” технологией, то есть используемой для специальных применений (например, там, где требуется высокая радиационная стойкость). Однако внедрение этой технологии в области массовой электроники сулит большие перспективы. Поэтому, многие ведущие электронные корпорации (IBM, Motorola, Sony) активно ведут исследования в области развития технологии MRAM.

Магниторезистивные наноструктуры лежащие в основе конструкции элементов магнитной памяти и датчиков магнитного поля состоят из большого числа слоев различных материалов. Поэтому выбор оптимальных конструкций данных устройств представляет собой сложную задачу, предполагающую использование многомасштабного моделирования на всех этапах проектирования и отработки технологии формирования. С этой целью необходимо создание иерархии моделей описывающих различные функциональные характеристики разрабатываемых устройств.

Ключевым компонентом такой системы моделей является микромагнитная модель, позволяющая прогнозировать магнитные характеристики многослойных магнитных наноструктур [1–3]. В настоящее время имеется ряд известных пакетов микромагнитного моделирования (OOMMF, MAGPAR [4, 5]), которые могут решать такие задачи. Однако, такие программы характеризуются значительной сложностью и большим объемом кода. К тому же отсутствует подробная документация с описанием всех деталей реализации алгоритмов. Поэтому, модификация таких программ с целью тонкой настройки на конкретную задачу весьма затруднена. В связи с этим, нами была поставлена задача создания собственной программы микромагнитного моделирования. Полученный код MICROMAG был проверен на стандартных задачах, путем сравнения с результатами широко известной программы OOMMF [4]. На следующем этапе данный программный комплекс, включающий собственно расчетный блок и средства визуализации полей намагничивания,





Костров, А. И. Макромодель ячейки памяти с магнитным туннельным переходом / А. И. Костров. – Текст : непосредственный // Нано- и микросистемная техника. – 2011. – № 2. – С. 7-11 : 8 рис. . – Библиогр.: с. 11 (10 назв.). – Имеется электронная версия печатной публикации. – URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=16517871> (дата обращения: 10.02.2021). – Режим доступа: свободный. – ISSN 1813-8586.

## КОНСТРУИРОВАНИЕ И МОДЕЛИРОВАНИЕ МНСТ

УДК 621.382

А. И. Костров, аспирант,  
e-mail: kostrov-s@tut.by  
Белорусский государственный университет  
информатики и радиоэлектроники, Минск

### МАКРОМОДЕЛЬ ЯЧЕЙКИ ПАМЯТИ С МАГНИТНЫМ ТУННЕЛЬНЫМ ПЕРЕХОДОМ

Поступила в редакцию 28.08.10

Предложены электрическая макромодель и живая-лентная схема ячейки магниторезистивной памяти на основе магнитного туннельного перехода, переключаемого спин-поляризованным током. В ней использованы нелинейные резисторы для представления параллельного и антипараллельного состояний намагниченности ферромагнитных слоев. Модель ориентирована на применение в системах компьютерного моделирования и проектирования интегральных микросхем. Ее точность и вычислительная эффективность продемонстрированы на примере элемента магниторезистивной памяти.

**Ключевые слова:** магниторезистивная память, спинтроника, магнитный туннельный переход, моделирование, макромодель, spice

#### Введение

Открытие эффектов гигантского магнитосопротивления [1] и туннельного магнитосопротивления [2] стимулировало разработку интегральных элементов спинтроники на их основе: магниторезистивной памяти с произвольной выборкой (MRAM) [3, 4], программируемых интегральных схем (ПЛИС), триггеров, регистров, компараторов, биочипов [5, 6]. Однако разработка аналоговых и цифровых схем с использованием ферромагнитных наноструктур ограничена, что объясняется отсутствием устойчивых, эффективных, простых в использовании моделей, которые адекватно моделируют электрические характеристики магнитных туннельных переходов (МТП) и могут легко модифицироваться и встраиваться в программы схемотехнического компьютерного проектирования интегральных микросхем.

Первые попытки реализации макромоделей МТП были осуществлены в работах [7, 8] с применением программы моделирования HSPICE. Однако использование этих моделей не всегда приводило к сходности расчетов, незначительные модификации подсхем требовали существенных временных затрат для достижения приемлемой сходности.

К тому же HSPICE содержит набор компонентов, таких как нелинейный резистор, которые в оригинальной программе-симуляторе Berkeley SPICE [9] отсутствуют. Поэтому использование таких моделей осложнялось в SPICE-подобных программах компьютерного проектирования интегральных микросхем.

Предложена устойчивая, эффективная в использовании и настройке, построенная по модульному принципу макромодель ячейки памяти с магнитным туннельным переходом, переключаемым спин-поляризованным током. Ее описание и результаты тестирования в составе блока магниторезистивной памяти представлены в данной статье. В модели используются компоненты программы SPICE, что является достаточным для ее прямого применения в любой системе проектирования интегральных микросхем без создания дополнительных специфических элементов и схем.

#### Макромодель

Структурная электрическая схема ячейки памяти с МТП представлена на рис. 1. Она состоит из трех модулей: магнитный модуль — формирует гистерезисную характеристику входного тока, модуль хранения двоичного бита — сохраняет направление относительной ориентации магнитомягкого слоя МТП, магниторезистивный модуль — моделирует управляемое напряжением сопротивление в параллельном и антипараллельном состояниях намагниченности ферромагнитных слоев.

Режим хранения моделируется бистабильными состояниями триггера Шмитта, который представлен на рис. 1 как модуль хранения двоичного бита. Входной сигнал триггера Шмитта задается магнитным модулем как импульс  $\pm 5 \text{ В}$  ( $V_{imp}$ ) для установки необходимого уровня выходного сигнала триггера. Магниторезистивный модуль содержит два нелинейных резистора, подключенных параллельно посредством управляемых напряжением ключей (VCS — Voltage Controlled Switch), которые управляются выходным сигналом триггера Шмитта  $V_{sc}$ . Ключ VCS, подключенный к параллельному резистору  $R_p$ ,

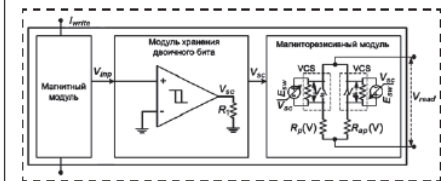


Рис. 1. Модель ячейки памяти с магнитным туннельным переходом



# РАДИОТЕХНИКА И ЭЛЕКТРОНИКА

<http://www.maik.ru>

Гуляев, Ю. В. Инжекция спинов током в магнитных переходах металл-металл / Ю. В. Гуляев, П. Е. Зильберман, Э. М. Эпштейн, Р. Дж. Эллиот. – Текст : непосредственный // Радиотехника и электроника. – 2003. – Т. 48, № 9. – С. 1030-1044 : 6 рис. – Библиогр.: с. 1043-1044 (47 назв.). – ISSN 0033-8494.



“НАУКА”  
МАИК “НАУКА/ИНТЕРПЕРИОДИКА”

Научная библиотека  
Саратовского университета  
Осн. экз.  
187382

## ИНЖЕКЦИЯ СПИНОВ ТОКОМ В МАГНИТНЫХ ПЕРЕХОДАХ МЕТАЛЛ–МЕТАЛЛ

© 2003 г. Ю. В. Гуляев, П. Е. Зильберман, Э. М. Эпштейн, Р. Дж. Эллиотт

Поступила в редакцию 16.04.2003 г.

Обобщены исследования последнего времени по влиянию поляризованного по спину тока на магнитное состояние тонких металлических ферромагнитных слоев в составе магнитных переходов. Рассмотрены трехслойные переходы типа “ферромагнитный металл–ультратонкий немагнитный разделяющий слой–ферромагнитный металл”. Ток течет перпендикулярно границам раздела слоев.

### ВВЕДЕНИЕ

В последние годы быстрыми темпами развивается направление физики и электроники твердого тела, получившее название “спинтроника” (от англ. spin-transport electronics) [1]. Название связано с тем, что решающую роль в изучаемых явлениях играет перенос (транспорт) спина электронов и связанного с ним магнитного момента. Одним из объектов изучения в спинтронике являются так называемые магнитные переходы. Речь идет о проводящей ток слоистой структуре, которая состоит из ферромагнитных металлических слоев, разделенных ультратонким немагнитным слоем (полупроводниковым, металлическим или диэлектрическим). Характер проводимости таких переходов во многом определяется разделяющим слоем. Например, при диэлектрическом разделяющем слое проводимость определяется туннельным эффектом (туннельные переходы). Как правило, требуется, чтобы длина релаксации спина была значительно больше толщины разделяющего слоя. В таком случае ток через переход сильно зависит от взаимной ориентации намагниченностей соседних ферромагнитных слоев. Указанная ориентация может искусственно меняться путем варьирования внешнего магнитного поля. На этом основан эффект так называемого “гигантского” магнитосопротивления [2]. Исследованию названного и связанных с ним эффектов посвящено огромное, быстро увеличивающееся число работ (см. обзоры [3–6]). Эти исследования уже находят практические применения для создания устройств памяти (MRAM) и датчиков магнитного поля [7].

При изучении влияния магнитного состояния переходов на протекающий через них ток был экспериментально обнаружен в некотором смысле обратный эффект – влияние поляризованного по спину тока на магнитное состояние [8–16]. Если эффект гигантского магнитосопротивления интересен для приложений тем, что позволяет считывать уже записанную на магнитном носителе

информацию, то обратный эффект, как можно ожидать, будет интересен новыми возможностями для записи информации.

В настоящее время исследования находятся на стадии выяснения основных механизмов влияния тока на магнитное состояние перехода. Очевидный механизм влияния тока – это влияние через индукционное (амперовское) магнитное поле. Однако из-за дальнедействующего характера этого поля невозможно обеспечить высокоплотную упаковку элементов памяти в матрице так, чтобы они оставались независимыми друг от друга. Именно поэтому основное внимание сейчас привлекают очень плотные упакованные элементы малых размеров, управляемые небольшим током, когда индукционным магнитным полем можно пренебречь. Управление током в таких элементах достигается за счет короткодействующего (на атомных масштабах) квантово-механического обменного взаимодействия. Были предложены различные возможные механизмы такого взаимодействия, которые можно подразделить на поверхностные и объемные.

В работах [17–21] предложен механизм зависящего от спина поверхностного рассеяния носителей тока. В результате такого рассеяния угловой момент передается от носителей тока к системе локализованных спинов решетки, и это приводит к переориентации вектора намагниченности в ферритовых слоях. Механизм действует на расстояниях порядка квантовой длины волны от границы раздела слоев, которая в типичных случаях составляет ~1...2 нм. Тем не менее механизм этот весьма эффективен и часто привлекается для объяснения экспериментов (см., например, [8–16]).

В работах [22, 23] предложен механизм косвенного обменного взаимодействия между ферромагнитными слоями, осуществляемый с помощью носителей тока. Оценки показывают [23], что ток на порядки увеличивает эффективность обмена. Данный механизм также действует на

53  
54

09 ОКТ 2018

Входит в состав базы Russian Science Citation Index (RSCI) на платформе Web of Science

ISSN 0033-8486

## РАДИОТЕХНИКА

Radioengineering XXI век

8 2018

В номере:

РАДИОСИСТЕМЫ

Выпуск 222

Информационный конфликт  
в спектре электромагнитных волн, № 34

Микроволновая техника (работы ученых г. Саратова)

и др.

Туркин, Я. В. Поправки для уравнений электромагнитного поля в присутствии низкоразмерных электронных систем со спин-орбитальным взаимодействием / Я. В. Туркин, П. В. Купцов. – Текст : непосредственный // Радиотехника. – 2018. – № 8. – С. 182-186. – Библиогр.: с. 185-186 (12 назв.). – ISSN 0033-8486.



тел./факс: (495) 625-9241  
e-mail: info@radiotec.ru  
http://www.radiotec.ru

ПОДПИСНОЙ ИНДЕКС 70775 В КАТАЛОГЕ АГЕНТСТВА «РОСПЕЧАТЬ»: ГАЗЕТЫ И ЖУРНАЛЫ

Микроволновая техника (Работы ученых г. Саратова)

УДК 537.8, 537.9

## Поправки для уравнений электромагнитного поля в присутствии низкоразмерных электронных систем со спин-орбитальным взаимодействием

© Авторы, 2018  
© ООО «Издательство «Радиотехника», 2018

**Я.В. Туркин** – аспирант, кафедра «Электронные приборы и устройства», Саратовский государственный технический университет имени Гагарина Ю.А.  
E-mail: turkin.yaroslav@gmail.com

**П.В. Купцов** – д.ф.-м.н., профессор, кафедра «Приборостроение», Саратовский государственный технический университет имени Гагарина Ю.А.  
E-mail: p.kuptsov@rambler.ru

Выведены уравнения Максвелла с поправками, учитывающими спин-орбитальное взаимодействие в двумерном электронном газе. Получено решение задачи при помощи континуального интеграла для квантового поля невзаимодействующих фермионов. Найдены поправки для полевых уравнений методом варьирования эффективного действия функционального интеграла. Отмечено, что искомые добавочные слагаемые зависят от силы и типа спин-орбитального взаимодействия двумерного электронного газа. Показано, что наличие спиновой плотности при ненулевом спин-орбитальном взаимодействии соответствует протеканию электрического тока.

**Ключевые слова:** двумерный электронный газ, спинтроника, спин-орбитальное взаимодействие, спиновый перенос, топологические изоляторы, континуальный интеграл, эффективное действие.

Maxwell equations for the electromagnetic fields coupled with the spin-polarized electron gas have been developed from the variation of the functional path integral. Additional terms in Maxwell equations depend on magnitude and type of the spin-orbit coupling of a two-dimensional electron gas. It was shown that additional terms appear in Ampere law in the presence of spin-polarized electron gas with spin-orbit coupling. This terms act like an effective electrical current density and depend on the magnitude and type of spin-orbit coupling and on the value of spin density.

**Keywords:** two-dimensional electron gas, spintronics, spin-orbit coupling, spin transport, topological insulators, functional path integral, effective action.

DOI: 10.18127/j00338486-201808-34

Низкоразмерные системы со спин-орбитальным взаимодействием становятся все более востребованными для использования в полупроводниковой спинтронике, нанозлектронике, квантовой оптике и плазмонике. К таким структурам относятся графен, двумерные дираковские материалы, полупроводниковые гетероструктуры, топологические изоляторы [1] и т.д. Примером использования таких структур могут служить детекторы электромагнитных полей, элементы спин-плазмонных схем [2], элементы для инжектирования спинового тока в устройствах спинтроники и спин-трансферные осцилляторы терагерцевого диапазона [3]. Однако вопросы прохождения поверхностных электромагнитных волн на границах структур со спин-орбитальным взаимодействием рассматриваются в основном с целью получения дисперсионных характеристик спиновых плазмонов [4] и не затрагивают задач макроскопической электродинамики, которые играют решающую роль в проектировании устройств плазмоники и спинтроники: расчет коэффициентов отражения и прохождения, умножение частоты, формирование спиновых волн, создание неоднородных спиновых токов и спиновых поляризацій.

Цель работы – предложить способ учета спиновых токов и спиновых поляризацій в макроскопических уравнениях Максвелла при помощи стандартного формализма квантовой теории поля.

### Электронный газ со спин-орбитальным взаимодействием

Эффект спин-орбитального взаимодействия имеет релятивистскую природу и заключается во взаимодействии спина и импульса электрона. Спин-орбитальное взаимодействие для электронов, движущихся в кристаллической структуре, обусловлено их круговым релятивистским движением в пределах отдельных атомов кристаллической решетки. При этом их средняя скорость поступательного движения остается нерелятивистской.

53  
54

базы Russian Science Citation Index (RSCI) на платформе Web of Science

ISSN 0033-8486

# РАДИОТЕХНИКА

Radioengineering

XXI век

том 83, номер 8(12), 2019

В номере:

**Микроволновая техника  
(работы ученых г. Саратова)**

Туркин, Я. В. Фотоиндуцированная спиновая поляризация в двумерном материале со спин-орбитальным взаимодействием / Я. В. Туркин, А. С. Губина. – Текст : непосредственный // Радиотехника. – 2019. – № 8, ч. 2. – С. 128-133 : 3 рис. – Библиогр.: с. 132 (5 назв.). – ISSN 0033-8486.



тел./факс: (495) 625-9241  
e-mail: info@radiotec.ru  
http://www.radiotec.ru



ПОДПИСНОЙ ИНДЕКС 70775 В КАТАЛОГЕ АГЕНТСТВА «РОСПЕЧАТЬ»: ГАЗЕТЫ И ЖУРНАЛЫ

Микроволновая техника (работы ученых г. Саратова)

УДК 535.215.9

## Фотоиндуцированная спиновая поляризация в двумерном материале со спин-орбитальным взаимодействием

© Авторы, 2019  
© ООО «Издательство «Радиотехника», 2019

**Я.В. Туркин** – ст. науч. сотрудник,  
ООО НПП «НИКА-СВЧ» (г. Саратов)  
E-mail: turkin.yaroslav@gmail.com

**А.С. Губина** – студент,  
кафедра «Электронные приборы и системотехника»,  
Саратовский государственный технический университет имени Гагарина Ю.А.  
E-mail: anna.gubina1@icloud.com

### Аннотация

**Постановка проблемы.** Оптическая генерация спиновой поляризации позволяет управлять спинтронными устройствами при помощи света. Эффективность оптической спиновой генерации в двумерных материалах зависит от величины фотоиндуцированной спиновой поляризации. Решение дифференциальных уравнений для эволюции матрицы плотности для системы безмассовых носителей заряда позволяет установить величину неравновесной спиновой поляризации, возникающей при облучении двумерного материала светом.

**Цель.** Показать теоретически, что при облучении светом с круговой поляризацией двумерного материала, обменно-связанного с магнитной подложкой, возникает неравновесная спиновая поляризация и вращающий момент, действующий на намагниченность подложки.

**Результаты.** Установлено, что для фиксированного электронного состояния при резонансном возбуждении светом с круговой поляризацией величина неравновесной спиновой поляризации может достигать значения 0,05. Показано, что двумерные материалы при облучении светом способны индуцировать вращательный момент, который возбуждает колебания намагниченности в подложке.

**Практическая значимость.** Возбуждение спиновой поляризации в двумерных материалах позволяет осуществлять спиновую инжекцию в немагнитные диэлектрики и металлы, а также переключать намагниченность в тонких ферромагнитных и антиферромагнитных пленках. Это открывает перспективы для создания быстрых и компактных оптоспинтронных устройств, таких как генераторы ТГц-излучения.

### Ключевые слова

Дираковский материал, фотогенерация, спиновая поляризация, спин-орбитальное взаимодействие, спинтроника.

DOI: 10.18127/j00338486-201908(12)-20

### Введение

Одним из основных вопросов современной спинтроники является эффективное управление намагниченностью при помощи спин-поляризованного тока. Общая идея переключения и управления ориентацией магнитных моментов при прохождении электрического тока через магнетики основана на связи между спинами свободных электронов и локальной намагниченностью материала. Данная связь обусловлена обменным и спин-орбитальным взаимодействиями.

В кристаллах с отсутствующим центром инверсии вырожденные по спину электронные энергетические зоны расщепляются из-за эффекта спин-орбитального взаимодействия. Важной особенностью этого эффекта является возникновение эффективного магнитного поля, которое зависит от собственного магнитного момента частицы. В двумерных кристаллических системах основной вклад в гамилтониан спин-орбитального взаимодействия вносит взаимодействие Рашбы, возникающее при нарушении поверхностной симметрии в двумерных материалах или гетероструктурах. Направление спина электрона в этом случае зависит от направления импульса, этот эффект получил названия спин-импульсного закрепления. При этом силой спин-орбитального взаимодействия Рашбы можно управлять постоянным электрическим полем, приложенным перпендикулярно поверхности образца. Эти свойства открывают возможности для реализации спинтронных устройств [1, 2], в которых управление спиновой поляризацией носителей заряда осуществляется чисто электрическим полем без приложения дополнительных магнитных полей.

Большой интерес вызывает генерация спиновых токов в двумерных материалах, обменно-связанных с магнитными диэлектриками [3]. Этот интерес обусловлен возможностью быстрого пере-

53  
217

# Физическое образование в вузах

Кругляк, Ю. А. Уроки нанoeлектроники. Ч. 6. Начала спинтроники в концепции «снизу-вверх» / Ю. А. Кругляк. – Текст : непосредственный // Физическое образование в вузах. – 2014. – Т. 20, № 2. – С. 88-108 : 15 рис. – Библиогр.: с. 107-108 (30 назв.). – Имеется электронная версия печатной публикации. – URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=21589891> (дата обращения: 10.02.2021). – Режим доступа: по подписке. – ISSN 1609-3143.

100991

Издательский Дом Московского Физического общества

УДК 537.1

## Уроки нанoeлектроники. 6. Начала спинтроники в концепции «снизу – вверх»

Юрий Алексеевич Кругляк

Одесский государственный экологический университет, Одесса, Украина;  
e-mail: quantumnet@yandex.ua

В рамках концепции нанoeлектроники «снизу – вверх» рассматриваются ключевые темы спинтроники – спиновый вентиль, граничное сопротивление при несовпадении мод проводимости, спиновые потенциалы и разность нелокальных спин-потенциалов, спиновый момент и его транспорт, обращение намагниченности спиновым током, поляризаторы и анализаторы спинового тока.

*Ключевые слова:* нанofизика, нанoeлектроника, спинтроника, спиновый вентиль, спиновый потенциал, спиновый момент, спиновый транспорт, спиновый ток, намагниченность, топологический диэлектрик, уравнение диффузии, баллистический транспорт.

**Введение.** В продолжение предыдущих сообщений [1, 2] в рамках концепции нанoeлектроники «снизу – вверх» [3] рассмотрим ключевые темы спинтроники.

Электроника второй половины XX века основывалась на транспорте заряда электронов и управления им электрическими и магнитными полями (зарядовая электроника). В конце века началось бурное развитие нового направления, основанного на том, что электроны имеют не только электрический заряд, но и спин и связанный с ним магнитный момент. Это направление получило название спиновой электроники или спинтроники (*spin-transport electronics*).

Среди работ, предвосхитивших развитие спинтроники, отметим пионерские исследования М.И. Дьяконова и В.И. Переля, показавших возможность ориентации спинов при протекании тока [4], М. Жюльера по туннельному магнитосопротивлению [5], А.Г. Аронова и Г.Е. Пикуса по спиновой инжекции в полупроводниках [6]. И поныне, 40 лет спустя, исследования в области спинтроники ведутся в области этих трех открытых эффектов – инжекции в магнитных переходах носителей с определенным направлением спина, переключения таких переходов спин-поляризованным током и гигантского магнитосопротивления.

Началом современного этапа исследований в области спинтроники принято считать работы [7, 8], в которых было экспериментально показано, что электронный ток в ферромагнитном металле поляризован по спину, и было открыто явление гигантского магнитосопротивления. Поляризация тока открыла возможность управления транспортом спинов в ферромагнитных структурах с помощью магнитных

# 45 лет

## ФАКУЛЬТЕТУ ФИЗИЧЕСКОЙ И КВАНТОВОЙ ЭЛЕКТРОНИКИ

Московского физико-технического института



ЧАСТЬ 2



Тел./факс: (495) 625-9241  
E-mail: [info@radiotec.ru](mailto:info@radiotec.ru)  
<http://www.radiotec.ru/>

ПОДПИСНОЙ ИНДЕКС 70325 В КАТАЛОГЕ АГЕНТСТВА "РОСПЕЧАТЬ": ГАЗЕТЫ И ЖУРНАЛЫ

### Приборы нанoeлектроники

© Авторы, 2010

А. А. Щука –

д.т.н., действительный член Международной академии наук, проф. МИРЭА  
E-mail: [shuka@mail.mipt.ru](mailto:shuka@mail.mipt.ru)

Представлен обзор состояния разработок нанoeлектронных структур, а также проблем, связанных с такими разработками.

**Ключевые слова:** нанoeлектроника, нанотранзисторы, спинтроника, политроника.

This survey is devoted to state of the art of nanoelectronic structures and some problems related to their development.

**Keywords:** nanoelectronics, nanotransistors, spintronics, polytronics.

#### Введение

Успехи микрoeлектроники сегодняшнего дня поражают специалистов смелостью новых технических решений, надежным воплощением в кремний и метал идей с помощью филигранной планарной технологии. Но специалисты уже видят физические и технологические барьеры, к которым неизбежно подойдет микрoeлектроника, и поэтому ищут пути в наномир. Великий Ричард Фейнман еще в 1960 г. сказал: «Внизу полным полно свободного места: приглашение в новый мир физики». Он имел в виду мир нанометрового масштаба, в котором стыкуются объекты неживой и живой природы.

Неспециалисты платят деньги за конечное изделие, поэтому микрoeлектронный прибор должен быть многофункциональным, надежным и дешевым. Они в школе учили закон Ома, в соответствии с которым работает утюг, электролампочка и... интегральная микросхема.

Нанoeлектронику на сегодняшнем этапе развития можно определить как направление электроники, в котором изучаются законы взаимодействия электронов, других заряженных частиц и квазичастиц с электромагнитными полями в различных средах, а также использование этого взаимодействия для создания электронных приборов методами нанотехнологии.

Нанотехнология это сумма технологий и сумма методов обработки материалов, основанных на манипуляциях с отдельными атомами и молекулами, биологическими объектами с целью получения новых материалов, приборов и устройств, а также формирование приборных структур с характеристическими размерами порядка 10–100 нм. Нанотехнология является междисциплинарной наукой.

Технология нанoeлектроники началась со сборки отдельных атомов в определенные формы. Так появились квантовые точки и квантовые про-

волоки из квантовых точек. Квантовые проволоки были сгруппированы в квантовые транзисторы, а те, в свою очередь, – в нейроноподобные интегральные схемы. Однако это далеко не единственный технологический путь в нанoeлектронике.

Нанoeлектронные приборы это приборы уже другого поколения, другого мира, где закон Ома не действует, где гальванические связи заменяются полевыми, где электрон «работает» не частицей, а волной и переносит не заряд, а волновую функцию...

Сегодня очертить границы использования известных технологических процессов в нанотехнологиях очень трудно. О границах завтрашнего дня говорить еще сложнее. На этом этапе будем отталкиваться от технологии и материалов микрoeлектроники и придерживаться стратегии «сверху – вниз» (top – down). Это означает, что уменьшение размеров элементов интегральных схем приводит к повышению функциональной сложности, быстродействия и снижению стоимости интегральных схем. При этом физические принципы функционирования интегральных схем не претерпевают существенной коррекции.

Переход к наноразмерам элементов интегральных схем качественно меняет принципы функционирования транзисторных и других элементов схем. Вступают в силу законы квантового мира. Сложные нанoeлектронные системы можно создавать в соответствии со стратегией «снизу – вверх» (bottom – up). Такая стратегия требует совершенно новых подходов. В этом случае используются атомо-молекулярные блоки, которые формируют нанoeлектронные системы с помощью процессов самосборки, самоорганизации сложных структур.

Сегодня нет завершенных технологических процессов для создания нанoeлектронных систем в соответствии со стратегией «снизу – вверх» в рамках групповой технологии. Но они обязательно появятся

Щука, А. А. Приборы нанoeлектроники / А. А. Щука. – Текст : непосредственный // Успехи современной радиоэлектроники. – 2010. – № 6 ; 45 лет факультету физической и квантовой электроники Московского физико-технического института. – 2010. – Ч. 2. – С. 62-78 : 19 рис. – Библиогр.: с. 78 (8 назв.). – ISSN 2070-0784. – журнал в журнале

Смирнов, А. И. Магнитный резонанс спинов в квантовых магнетиках / А. И. Смирнов. – Текст : непосредственный // Успехи физических наук. – 2016. – Т. 186, № 6. – С. 633-639 : 13 рис. – Библиогр.: с. 639 (24 назв.). – Имеется электронная версия печатной публикации. – URL: <https://ufn.ru/ru/articles/2016/6/f> (дата обращения: 10.02.2021). – Режим доступа: свободный. ISSN 0042-1294.

Том 186, № 6

## УСПЕХИ ФИЗИЧЕСКИХ НАУК

## КОНФЕРЕНЦИИ И СИМПОЗИУМЫ

70 ЛЕТ КАЗАНСКОМУ ФИЗИКО-ТЕХНИЧЕСКОМУ ИНСТИТУТУ ИМ. Е.К. ЗАВОЙСКОГО  
КАЗАНСКОГО НАУЧНОГО ЦЕНТРА РАН

## Магнитный резонанс спинов в квантовых магнетиках

А.И. Смирнов

*В спин-жидкостных фазах магнетиков с цепочечной и треугольной решётками обнаружена и изучена тонкая структура спинового континуума, возникающая на малых волновых векторах под действием однородного взаимодействия Дзюляковского–Морри. В упорядоченной фазе с сильной квантовой редукцией параметра порядка обнаружено сосуществование возбуждений магнитного и спинового типов, с кроссовером от первого ко второму при превышении энергией возбуждения энергии обменного взаимодействия.*

**Ключевые слова:** спиновые цепочки, магнитный резонанс, антиферромагнетик, квантовые магнетики

PACS numbers: 75.10.Jm, 75.10.Pq, 75.40.Gb, 76.30. – v

DOI: 10.3367/UFN.2016.02.037757

## Содержание

1. Введение. Континуум возбуждений в антиферромагнитных спиновых цепочках (633).
  2. Эксперимент (635).
  3. Магнитный резонанс спинов в цепочечном антиферромагнетике с однородным взаимодействием Дзюляковского–Морри (635).
  4. Магнитный резонанс спинов в квазидвумерном антиферромагнетике на треугольной решётке (637).
  5. Заключение (639).
- Список литературы (639).

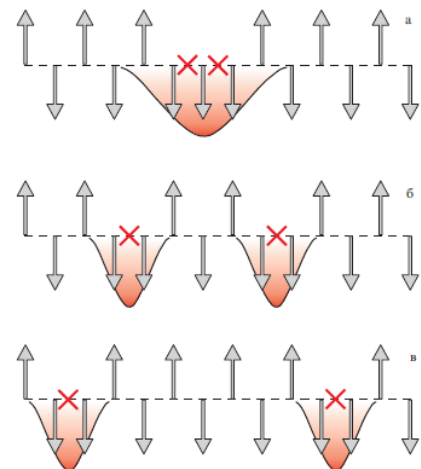
## 1. Введение. Континуум возбуждений в антиферромагнитных спиновых цепочках

В теоретических исследованиях, начатых Х. Бете [1], было показано, что, вопреки классическим предсказаниям, основное состояние антиферромагнитной гейзенберговской цепочки спинов  $S = 1/2$  является сильно флуктуирующим — среднее значение проекции спина на любом узле решётки равно нулю. В то же время это состояние является сильно коррелированным, для него антиферромагнитные корреляции спинов спадают медленно, по степенному закону. Таким образом, при абсолютном нуле температуры состояние спиновой цепочки является критическим — дальний магнитный порядок традиционного типа отсутствует, но радиус корреляции бесконечен.

Проблема возбуждённых состояний квантовых спиновых цепочек также оказывается весьма интересной. Теоретические исследования [2] показали, что спиновая структура элементарного возбуждения аналогична спиновой структуре доменной стенки в неслесковом антиферромагнетике, в отличие от структуры классического

магнона, прообразом которого является один перевёрнутый спин.

Отметим, что один перевёрнутый спин порождает две доменные стенки на расстоянии, равном одному периоду цепочки. В одномерной цепочке эти доменные стенки могут без затрат энергии и изменения полного спина отойти друг от друга на любое расстояние. Спиновые структуры, соответствующие магнону и двум доменным стенкам, изображены на рис. 1. Эти специфические воз-



**Рис. 1.** Схематическое изображение спиновых проекций в узлах спиновой цепочки. (а) Спиновая конфигурация, соответствующая магнону, несущему спин  $S = 1$ . (б, в) Спиновые конфигурации с той же обменной энергией, соответствующие паре спинов, не связанных друг с другом.

А.И. Смирнов, Институт физических проблем им. П.Л. Капицы РАН, ул. Косыгина 2, 119334 Москва, Российская Федерация  
E-mail: smirnov@kapitza.ras.ru

Статья поступила 17 марта 2016 г.

Самохвалов, А. В. Механизмы дальнего действующего баллистического транспорта в сверхпроводящей спинтронике / А. В. Самохвалов, А. С. Мельников, А. И. Буздин. – Текст : непосредственный // Успехи физических наук. – 2016. – Т. 186, № 6. – С. 640-646 : 6 рис. – Библиогр.: с. 645-646 (36 назв.). – Имеется электронная версия печатной публикации. – URL: <https://ufn.ru/ru/articles/2016/6/g> (дата обращения: 10.02.2021). – Режим доступа: свободный. – ISSN 0042-1294.

## УСПЕХИ ФИЗИЧЕСКИХ НАУК

## КОНФЕРЕНЦИИ И СИМПОЗИУМЫ

70 ЛЕТ КАЗАНСКОМУ ФИЗИКО-ТЕХНИЧЕСКОМУ ИНСТИТУТУ ИМ. Е.К. ЗАВОЙСКОГО  
КАЗАНСКОГО НАУЧНОГО ЦЕНТРА РАН

## Механизмы дальнего действующего баллистического транспорта в сверхпроводящей спинтронике

А.В. Самохвалов, А.С. Мельников, А.И. Буздин

*Представлен краткий обзор механизмов, обеспечивающих дальнедействующий джозефсоновский транспорт между двумя синглетными сверхпроводниками в баллистических гибридных структурах сверхпроводник/ферромагнетик/сверхпроводник (SFS) с неоднородностью обменного поля в реальном или мнимом пространстве. Предложенные механизмы основаны на подавлении деструктивной интерференции электронных и дырочных состояний в ферромагнетике, обусловленной действием обменного поля, что обеспечивает медленное затухание синглетной компоненты парной корреляционной функции в ферромагнетике и заметный джозефсоновский ток в SFS-структуре.*

**Ключевые слова:** спинтроника, гибридные структуры сверхпроводник–ферромагнетик, эффект Джозефсона, эффект близости, триплетная сверхпроводимость

PACS numbers: 74.45.+c, 74.78.Na, 85.25.Cp

DOI: 10.3367/UFN.2016.02.037769

## Содержание

1. Введение (640).
  2. Эффект близости и дальнедействующие триплетные корреляции в гибридных структурах сверхпроводник–ферромагнетик (641).
  3. Дальнедействующий джозефсоновский транспорт через ферромагнитный барьер (642).
  4. Дальнедействующий джозефсоновский транспорт в ферромагнитном проводе со спин-орбитальным взаимодействием (643).
  5. Синглетный джозефсоновский транспорт при рассеянии с переворотом спина в баллистических структурах сверхпроводник–ферромагнетик–сверхпроводник (644).
  6. Заключение (645).
- Список литературы (645).

## 1. Введение

Развитие современных информационных технологий требует постоянного прогресса в области создания новых электронных (оптоэлектронных) устройств с

высоким быстродействием. До последнего времени развитие этой области в основном было связано с использованием различных полупроводников и гетероструктур на их основе. В то же время анализ и поиск возможных новых принципов работы, других перспективных материалов и структур представляются весьма актуальными и своевременными. Среди таких перспективных систем можно упомянуть метаматериалы различных типов с управляемыми электродинамическими параметрами и нанoeлектромеханические устройства, в которых обеспечивается связь между электронными и механическими степенями свободы такой системы. В частности, интерес исследователей привлекают возможные преимущества использования в таких системах сверхпроводников, что позволило бы снизить потери на диссипацию. Комбинация двух материалов с конкурирующими типами спинового упорядочения — сверхпроводника (S) и ферромагнетика (F) — открывает дополнительную уникальную возможность управлять сверхтекучим (бездиссипативным) транспортом, оказывая влияние на спиновую степень свободы, что может служить основой для реализации нового класса устройств сверхпроводящей спинтроники и наноплазмоники.

Хорошо известно, что возможность бездиссипативного спинового транспорта обеспечивается формированием вследствие эффекта близости [1] у SF-границы неоднородного сверхпроводящего состояния, подобного состоянию Ларкина–Овчинникова–Фульде–Феррелла (ЛОФФ) [2, 3], для которого характерно существование куперовских пар с ненулевым суммарным импульсом. Совместное влияние эффекта близости и обменного взаимодействия в гетерогенных гибридных SF-структурах вызывает появление в ферромагнетике сверхпро-

А.В. Самохвалов, А.С. Мельников,  
Институт физики микроструктур РАН,  
ГСП-105, 603950 Нижний Новгород, Российская Федерация;  
Нижегородский государственный университет  
им. Н.И. Лобачевского,  
просп. Гагарина 23, 603950 Нижний Новгород,  
Российская Федерация  
E-mail: samokh@ipm.sci-nnov.ru, melnikov@ipm.sci-nnov.ru  
А.И. Буздин, University of Bordeaux,  
LOMA UMR-CNRS 5798, F-33405 Talence Cedex, France  
E-mail: a.bouzidine@loma.u-bordeaux.fr

Статья поступила 4 апреля 2016 г.

53  
214

# Физическое образование в вузах

Борухович, А. С. Достижения физической науки в лекционный процесс: введение в спиновую электронику / А. С. Борухович. – Текст : непосредственный // Физическое образование в вузах. – 2006. – Т. 12, № 2. – С. 41-49 : 2 рис. – Библиогр.: с. 48-49 (11 назв.). – Имеется электронная версия печатной публикации. – URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=12795774> (дата обращения: 10.02.2021). – Режим доступа: свободный. – ISSN 1609-3143.

190-144

Издательский Дом Московского Физического общества

## Достижения физической науки в лекционный процесс: введение в спиновую электронику

А.С. Борухович

Российский государственный профессионально-педагогический университет  
г. Екатеринбург  
E-mail: [A.S.Bor@isvpu.ru](mailto:A.S.Bor@isvpu.ru)

Излагаются основные физические принципы работы устройств и необходимые требования к материалам, служащим базой бурно развивающейся отрасли физической электроники - спиновой микроэлектроники. Эти сведения в качестве достижений и проблем современной физической науки полезны для ознакомления студентов, как в специальных курсах, так и в курсе общей физики.

В последнее время в физической литературе все активнее обсуждается вопрос о необходимости введения в образовательный процесс сведений о достижениях и проблемах современной физической науки [1]. И не только в качестве специальных дисциплин или спецкурсов профессиональных физических или инженерных кафедр. Опыт показывает, что и в общем курсе физики, читаемом не только для профильных физических специальностей, «отступления» от планового изложения курса в виде ознакомления студентов с последними наиболее значимыми для повседневности достижениями физической науки вызывает у последних живой интерес. Тем более, когда эти сведения привносятся в лекциях преподавателей, непосредственно и активно участвующих в научных исследованиях.

В данном сообщении предлагается материал для ознакомления с бурно развивающейся в настоящее время областью твердотельной физической науки, известной как спиновая электроника. С ней связываются дальнейшее развитие в наступившем столетии микроэлектроники и информатики, создание квантовых компьютеров и новых возможностей вычислительной техники и связи.

Развитие электронного приборостроения конца XX в. ознаменовалось крупными достижениями технологии в области создания микросхем на базе многослойных гетероструктур металл - полупроводник. Под *гетероструктурой* обычно понимается группа контактов объемных полупроводниковых кристаллов (двух и более), имеющих на своих границах электрические металлические контакты. Подобные контактные структуры, полученные методами тонкопленочного напыления на изоляционную или металлическую подложку, получили название *мультислойных гетероструктур* (мультислоев). Использование напылительной техники позволяет добиться существенной миниатюризации электронных устройств. Интегральные микросхемы обеспечивают значительную экономию в



Микромагнетизм и топологические дефекты в магнитоэлектрических средах / А. П. Пятаков [и др.]. – Текст : непосредственный // Успехи физических наук. – 2015. – Т. 185, № 10. – С. 1077-1088 : 14 рис. – Библиогр.: с. 1087-1088 (87 назв.). – Имеется электронная версия печатной публикации. – URL: <https://ufn.ru/ru/articles/2015/10/k> (дата обращения: 10.02.2021). – Режим доступа: свободный. – ISSN 0042-1294.

Том 185, № 10

## УСПЕХИ ФИЗИЧЕСКИХ НАУК

## КОНФЕРЕНЦИИ И СИМПОЗИУМЫ

## Микромагнетизм и топологические дефекты в магнитоэлектрических средах

А.П. Пятаков, А.С. Сергеев, Е.П. Николаева, Т.Б. Косых,  
А.В. Николаев, К.А. Звездин, А.К. Звездин

*Дан краткий обзор исследований магнитоэлектрических материалов и мультиферроиков с учётом их доменной структуры. Особое внимание уделено магнитоэлектрическим явлениям в микромагнетизме на примере эпитаксиальных плёнок ферритов-гранатов (электроиндуцированное смещение и наклон доменных границ). Рассмотрено также влияние электрического поля на другие топологические дефекты в магнитоупорядоченных средах: линии и точки Блоха в доменных границах, магнитные вихри и скирмионы.*

**Ключевые слова:** мультиферроики, магнитоэлектрический эффект, доменная граница, скирмион, линия Блоха, точка Блоха

PACS numbers: 75.85.+t, 85.70.–w, 85.75.–d

DOI: 10.3367/UFN.0185.201510k.1077

## Содержание

1. Введение (1077).
  2. Экспериментальные результаты (1079).
  3. Теоретическая интерпретация результатов (1082).
    - 3.1. Возможные механизмы эффекта смещения доменных границ. 3.2. Неоднородное магнитоэлектрическое взаимодействие. 3.3. Изменение констант анизотропии.
  4. Микромагнитные структуры пониженной размерности (1084).
    - 4.1. Линии и точки Блоха. 4.2. Скирмионы. 4.3. Магнитные вихри.
  5. Заключение (1086).
- Список литературы (1087).

## 1. Введение

Магнитоэлектрическими называют среды, в которых наблюдаются перекрёстные эффекты, связанные с воздействием электрических полей на магнитную подсистему материала и обратным влиянием магнитного поля на диэлектрические характеристики или сегнетоэлектрическое состояние вещества. Последний случай относится

**А.П. Пятаков, А.С. Сергеев, Е.П. Николаева, Т.Б. Косых, А.В. Николаев.** Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, физический факультет, Ленинские горы, 119991 Москва, Российская Федерация  
E-mail: pyatakov@physics.msu.ru  
**К.А. Звездин.** Институт общей физики им. А.М. Прохорова РАН, ул. Вавилова 38, 119991 Москва, Российская Федерация  
E-mail: ryatakov@phystech.ru  
**А.К. Звездин.** Институт общей физики им. А.М. Прохорова РАН, ул. Вавилова 38, 119991 Москва, Российская Федерация; Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН, Ленинский просп. 53, 119991 Москва, Российская Федерация

Статья поступила 1 июля 2015 г.

к магнитным сегнетоэлектрикам или мультиферроикам [1, 2].

Традиционный подход к изучению свойств магнитоэлектрических веществ подразумевает однородность среды, при этом исследуемый объём вещества представляет собой один магнитный или сегнетоэлектрический домен. Это предполагает проведение измерений в достаточно сильных магнитных и электрических полях, поляризующих образец до насыщения. Однако в последнее время наметилась отчётливая тенденция к исследованию материалов в спонтанном состоянии, с учётом наличия в них доменной структуры [3–6], что связано со следующими обстоятельствами.

- Всё большее количество синтезируемых в настоящее время материалов приходится на долю тонких плёнок, в которых, согласно закону Киттеля, размер доменов уменьшается с уменьшением толщины плёнки. При этом объёмная доля доменных границ в материале и их роль в формировании его свойств возрастают.

- Некоторые магнитоэлектрические эффекты могут проявляться на масштабе отдельных доменов или даже доменных границ. При этом измерение интегрального, усреднённого по многим доменам, сигнала не даёт информации об изменениях такого рода.

- Особый интерес представляют отсутствующие в однородных образцах эффекты, связанные непосредственно с доменными границами и другими неоднородностями, такими как вихри, скирмионы, линии Блоха и др.

Так, в сегнетоэлектриках доменные границы имеют электропроводящие свойства, отличные от свойств доменов, которые они разделяют. Всплеск интереса к этому явлению возник после обнаружения в мультиферроике феррите висмута ВtFeO<sub>3</sub> повышенной проводимости доменных границ [7]. (Заметим, что в сегнетоэлектриках без магнитного упорядочения проводимость доменных границ была теоретически предсказана [8] и экспериментально обнаружена [9] значительно ранее.) Интересно, что даже при смещении доменной границы её "электропроводящий образ" остаётся запечатлённым в сегнетоэлектрике [10], что предположительно объясняется нако-

© А.П. Пятаков, А.С. Сергеев, Е.П. Николаева, Т.Б. Косых, А.В. Николаев, К.А. Звездин, А.К. Звездин 2015

Магنونика — новое направление спинтроники и спин-волновой электроники / С. А. Никитов [и др.]. – Текст : непосредственный // Успехи физических наук. – 2015. – Т. 185, № 10. – С. 1099-1128 : 34 рис. – Библиогр.: с. 1125-1128 (212 назв.). – Имеется электронная версия печатной публикации. – URL: <https://ufn.ru/ru/articles/2015/10/m> (дата обращения: 10.02.2021). – Режим доступа: свободный. – ISSN 0042-1294.

Том 185, № 10

## УСПЕХИ ФИЗИЧЕСКИХ НАУК

## КОНФЕРЕНЦИИ И СИМПОЗИУМЫ

## Магنونика — новое направление спинтроники и спин-волновой электроники

С.А. Никитов, Д.В. Калябин, И.В. Лисенков, А.Н. Славин,  
Ю.Н. Барабаненков, С.А. Осокин, А.В. Садовников, Е.Н. Бегинин,  
М.А. Морозова, Ю.П. Шараевский, Ю.А. Филimonov, Ю.В. Хивинцев,  
С.Л. Высоцкий, В.К. Сахаров, Е.С. Павлов

*Представлены результаты недавних исследований в актуальной быстро развивающейся области спинтроники и магнитоэлектроники — магنونике. Описаны экспериментальные методы исследования свойств и теоретические подходы к описанию результатов исследования физических процессов, связанных с распространением спиновых волн в сложных нано- и микроразмерных магнитных структурах. Приведены результаты применения магнитных структур для реализации их в элементной базе систем обработки и передачи информационных сигналов. В частности, рассмотрены результаты исследования распространения спиновых волн в распределённых магнитных периодических структурах, в сосредоточенных системах, в связанных волноводных структурах и управляемых магнитных структурах. Обсуждаются конкретные примеры элементной базы на основе магнитных структур, а также возможность её дальнейшего развития.*

**Ключевые слова:** магنونика, спинтроника, спинволновая электроника, магнитные кристаллы, сверхвысокочастотная электроника, магнитные структуры, спиновые волны, волноводы, магнитные плёнки, магнитная логика, устройства обработки информации

PACS numbers: 75.30.Ds, 85.70.–w, 85.75.–d

DOI: 10.3367/UFN.0185.201510m.1099

**С.А. Никитов.** Институт радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН, ул. Моховая 11-7, 125009 Москва, Российская Федерация; Московский физико-технический институт (государственный университет), Институтский пер. 9, 141700 Долгопрудный, Московская обл., Российская Федерация; Саратовский государственный университет им. Н.Г. Чернышевского, ул. Астраханская 83, 410012 Саратов, Российская Федерация  
E-mail: nikitov@phystech.ru  
**Д.В. Калябин, С.А. Осокин.** Институт радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН, ул. Моховая 11-7, 125009 Москва, Российская Федерация; Московский физико-технический институт (государственный университет), Институтский пер. 9, 141700 Долгопрудный, Московская обл., Российская Федерация  
E-mail: dmitry.kalyabin@phystech.edu, osokinserg@gmail.com  
**И.В. Лисенков.** Институт радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН, ул. Моховая 11-7, 125009 Москва, Российская Федерация; Московский физико-технический институт (государственный университет), Институтский пер. 9, 141700 Долгопрудный, Московская обл., Российская Федерация  
E-mail: ivan.lisenkov@phystech.edu  
**А.Н. Славин.** Oakland University, 2200 N. Squirrel Rd., Rochester, MI 48309, USA

**Ю.Н. Барабаненков.** Институт радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН, ул. Моховая 11-7, 125009 Москва, Российская Федерация  
E-mail: bara624@mail.ru  
**А.В. Садовников.** Институт радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН, ул. Моховая 11-7, 125009 Москва, Российская Федерация; Саратовский государственный университет им. Н.Г. Чернышевского, ул. Астраханская 83, 410012 Саратов, Российская Федерация  
E-mail: sadovnikovav@gmail.com  
**Е.Н. Бегинин, М.А. Морозова, Ю.П. Шараевский.** Саратовский государственный университет им. Н.Г. Чернышевского, ул. Астраханская 83, 410012 Саратов, Российская Федерация  
E-mail: egbegin@gmail.com, mamorozova@yandex.ru, SharaevskyYP@info.sgu.ru  
**Ю.А. Филimonov, Ю.В. Хивинцев, С.Л. Высоцкий.** Саратовский государственный университет им. Н.Г. Чернышевского, ул. Астраханская 83, 410012 Саратов, Российская Федерация; Саратовский филиал института радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН, ул. Зелёная 38, 410019 Саратов, Российская Федерация  
E-mail: yuri.a.filimonov@gmail.com, khivinsev@gmail.com, vysotski@gmail.com  
**В.К. Сахаров, Е.С. Павлов.** Саратовский филиал института радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН, ул. Зелёная 38, 410019 Саратов, Российская Федерация  
E-mail: valentin@sakharov.info, gekapavlov@gmail.com

Статья поступила 27 мая 2015 г.

© С.А. Никитов, Д.В. Калябин, И.В. Лисенков, А.Н. Славин, Ю.Н. Барабаненков, С.А. Осокин, А.В. Садовников, Е.Н. Бегинин, М.А. Морозова, Ю.П. Шараевский, Ю.А. Филimonov, Ю.В. Хивинцев, С.Л. Высоцкий, В.К. Сахаров, Е.С. Павлов 2015



# ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ ВОЛНЫ И ЭЛЕКТРОННЫЕ СИСТЕМЫ

9' 2014

$$\frac{53}{239}$$

Т. 19

В номере:



Выпуск подготовлен сотрудниками

ЮЖНОГО ФЕДЕРАЛЬНОГО УНИВЕРСИТЕТА

Синявский, Г. П. Анализ с позиций спиновой электроники нелинейных явлений и процессов в тонкопленочных ферроструктурах при воздействии внешних магнитных полей различной интенсивности / Г. П. Синявский, Л. В. Черкесова, Г. Н. Шаламов. – Текст : непосредственный // Электромагнитные волны и электронные системы. – 2014. – Т. 19, № 9. – С. 4-21 : 6 рис. – Библиогр.: с. 18-19 (33 назв.). – ISSN 1560-4128.



тел./факс: +7(495) 625-92-41  
info@radiotec.ru

ПОДПИСНОЙ ИНДЕКС 71961 В КАТАЛОГЕ АГЕНТСТВА «РОСПЕЧАТЬ»: ГАЗЕТЫ И ЖУРНАЛЫ

## Численное моделирование физических процессов в электронике и электродинамике

УДК 621.375.7

Анализ с позиций спиновой электроники нелинейных явлений и процессов в тонкопленочных ферроструктурах при воздействии внешних магнитных полей различной интенсивности

© Авторы, 2014

© ЗАО «Издательство «Радиотехника», 2014

**Г.П. Синявский** – д.ф.-м.н., профессор, академик РАЕН, зав. кафедрой «Прикладная электродинамика и компьютерное моделирование», Физический факультет, ЮФУ (г. Ростов-на-Дону)  
E-mail: sinyavsky@sfedu.ru; sin-gen@yandex.ru

**Л.В. Черкесова** – д.ф.-м.н., доцент, кафедра «Математика и информатика», факультет информатики и вычислительной техники, Донской ГТУ  
E-mail: chia2002@inbox.ru; larissa-cherkesova@mail.ru

**Г.Н. Шаламов** – вед. инженер, Ростовский НИИ радиосвязи, соискатель, кафедра «Прикладная электродинамика и компьютерное моделирование», Физический факультет, ЮФУ (г. Ростов-на-Дону)  
E-mail: niirs@niirs.ru; digital-master@mail.ru

Рассмотрены нелинейные явления и спин-эффекты, проявляемые в ферромагнитных пленках и ферроструктурах на пленочной основе, при воздействии на них внешних магнитных полей (накачки) различной интенсивности. Проведен анализ различных промышленных и экспериментальных образцов материалов радиоэлектронной техники, в которых происходят нелинейные явления, и их параметров, достигнутых к настоящему времени. Показано, что проявляемые в ферромагнитных структурах явления и эффекты подчиняются общим закономерностям, характерным для нелинейных параметрических зонных систем.

**Ключевые слова:** спинтроника, магнитосопротивление, внешнее магнитное поле, магнитная проницаемость, спин-вентильные и спин-туннельные эффекты, композитные структуры, нелинейные параметрические зонные системы (НПС).

On the background of physical processes and phenomena in ferromagnetic materials, the nonlinear phenomena and spin-effects shown in ferromagnetic films and ferrostructures for film-basis, when exposed to external magnetic fields (pumping) of different intensity. The analysis of various industrial and experimental samples of substances, materials of electronic engineering, in which there nonlinear phenomena, and their parameters achieved to date. It is shown by the fact that shown in ferromagnetic structures phenomena and effects are subject to the general regularities characteristic of nonlinear parametric zoned systems.

**Keywords:** spintronics, magnetoresistance, external magnetic field, the magnetic permeability, spin-valve and spin-tunnel effects, composite structures, nonlinear parametric zone system (NPS).

Бурное развитие спиновой электроники смещает привычные акценты, принятые в радиоэлектронике, как в отношении нелинейных эффектов, так и в отношении применяемых материалов, в область, где главную роль играют ферромагнитные материалы. В привычной зарядовой электронике металлам отводится пассивная роль из-за высокой концентрации свободных электронов, экранирующих электрические поля и исключающих возможность нарушать зарядовую нейтральность и управлять распределением заряда. Однако в достаточно сильных электромагнитных полях воздействие магнитных полей на движение электронов становится очень существенным из-за релятивистского эффекта (т.к. сила Лоренца  $F = q[vB]$  пропорциональна отношению скорости заряда к скорости света (если записать уравнение движения релятивистской частицы, такая зависимость появляется за счет изменения релятивистской массы) [1].

Известные гальвано- и термомагнитные эффекты, обусловленные действием магнитного поля на движение свободных электронов твердого тела (эффект Холла, магнитосопротивление и др.), для металлов используются, в основном, при изучении их свойств – энергетического спектра, механизма рассеяния электронов и т.д. [1]

При этом для ферромагнитных металлов ситуация существенно иная, так как обменное взаимодействие между электронами  $d$ -оболочек атомов, обусловленное перекрытием волновых функций, приводит к появлению спонтанной намагниченности. Это взаимодействие имеет не релятивистскую, а электроста-

Волков, Н. В. Спинтроника: магнитные туннельные структуры на основе манганитов / Н. В. Волков. – Текст : непосредственный // Успехи физических наук. – 2012. – Т. 182, № 3. – С. 263-285 : 20 рис. – Библиогр.: с. 284-285 (93 назв.). – Имеется электронная версия печатной публикации. – URL: <https://ufn.ru/ru/articles/2012/3/0c> (дата обращения: 10.02.2021). – Режим доступа: свободный. – ISSN 0042-1294.

Март 2012 г.

УСПЕХИ ФИЗИЧЕСКИХ НАУК

Том 182, № 3

ОБОЗРЫ АКТУАЛЬНЫХ ПРОБЛЕМ

## Спинтроника: магнитные туннельные структуры на основе манганитов

Н. В. Волков

*Обзор посвящён одной из актуальных и многообещающих областей спинтроники — изучению физических явлений, имеющих место при протекании спин-поляризованного тока через магнитные туннельные структуры. При этом мы остановили свой выбор только на структурах, построенных на основе манганитов. Привлекательность манганитов обусловлена высокой температурой Кюри, высокой степенью спиновой поляризации электронов проводимости, высокой химической стабильностью и, наконец, хорошо отработанной технологией получения. Особое внимание уделено некоторым нетрадиционным подходам к исследованию туннельных структур: использовали планарной геометрии, изучению спин-поляризованного транспорта в условиях внешних комбинированных воздействий (сверхвысокочастотное и оптическое излучение).*

PACS numbers: 72.25.-b, 75.76.+j, 85.75.-d

DOI: 10.3367/UFN.0182.201203b.0263

### Содержание

1. Введение (263).
2. Магнитные туннельные переходы на основе манганитов (264).
  - 2.1. Туннельный переход; проводимость магнитного туннельного перехода; туннельное магнетосопротивление; модель Жулье-ра.
  - 2.2. Манганиты: основные свойства.
  - 2.3. Манганиты как материалы с высокой спиновой поляризацией.
  - 2.4. Магнитные туннельные контакты на основе манганитов.
  - 2.5. Использование туннельных контактов на основе манганитов для анализа спиновой информации.
3. Спин-зависимые транспортные свойства туннельных структур на основе манганитов в геометрии "ток в плоскости" структуры (271).
  - 3.1. Управляемый током эффект переключения токовых каналов; нелинейные транспортные свойства.
  - 3.2. Переключение токовых каналов, управляемое магнитным полем; магниторезистивный эффект.
4. Кооперативные системы магнитных туннельных контактов на основе манганитов (273).
  - 4.1. Ферромагнитные гранулированные материалы как кооперативные системы магнитных туннельных контактов.
  - 4.2. Гранулированные материалы на основе манганитов; микроструктура.
  - 4.3. Гранулированные материалы на основе манганитов; туннельное магнетосопротивление.
5. Отклик магнитного туннельного перехода на воздействие электромагнитного излучения СВЧ-диапазона; детектирующие свойства туннельных контактов на основе манганитов (277).

Н. В. Волков, Институт физики им. Л. В. Киренского СО РАН, Академгородок 50, стр. 38, 660036 Красноярск, Российская Федерация  
Тел. (391) 243-26-35, Факс (391) 243-89-23  
E-mail: volk@iph.krasn.ru

Статья поступила 21 мая 2011 г.,  
после доработки 30 августа 2011 г.

- 5.1. Детектирующие свойства классического (немагнитного) туннельного перехода.
- 5.2. Детектирующие свойства магнитного туннельного перехода.
- 5.3. Детектирующие свойства магнитного туннельного перехода на основе манганитов (геометрия "ток в плоскости" структуры).
- 5.4. Магнитозависимый эффект детектирования СВЧ-излучения в кооперативной системе магнитных туннельных контактов на основе манганитов.
6. Влияние электромагнитного излучения на транспортные свойства магнитных туннельных структур; фотоэлектрические явления (282).
  - 6.1. Фотоэлектрический отклик классического (немагнитного) туннельного перехода.
  - 6.2. Влияние оптического облучения на транспортные свойства магнитной туннельной структуры на основе манганита.
7. Заключение (284).

Список литературы (284).

### 1. Введение

Исследования последних лет показали, что наличие спиновых степеней свободы у носителей заряда проявляется наиболее ярко, и порой неожиданным образом, прежде всего, в наноразмерных магнитных и гибридных структурах. Изучение отклика таких систем на протекание спин-поляризованного тока принесло в последние годы много интересных научных результатов и неожиданных сюрпризов, которые сделали весьма привлекательной идею использования спина электрона в качестве активного элемента для хранения, обработки и передачи информации [1, 2]. Сформировалось даже целое самостоятельное направление в физике конденсированного состояния — спинтроника — мультидисциплинарная область науки и техники, центральной темой которой является спин-зависимый электронный транспорт в твердых телах и наноразмерных структурах. Этот раздел охватывает и интереснейшие фундамен-

© Н. В. Волков 2012

Эффект Холла и его аналоги / А. Ф. Барабанов [и др.]. – Текст : непосредственный // Успехи физических наук. – 2015. – Т. 185, № 5. – С. 479-488. – Библиогр.: с. 487-488 (86 назв.). – Имеется электронная версия печатной публикации. – URL: <https://ufn.ru/ru/articles/2015/5/b> (дата обращения: 10.02.2021). – Режим доступа: свободный. – ISSN 0042-1294.

Май 2015 г.

УСПЕХИ ФИЗИЧЕСКИХ НАУК

Том 185, № 5

ОБОЗРЫ АКТУАЛЬНЫХ ПРОБЛЕМ

## Эффект Холла и его аналоги

А. Ф. Барабанов, Ю. М. Каган, Л. А. Максимов,  
А. В. Михеенков, Т. В. Хабарова

*Обращается внимание на сходство родственных кинетических явлений, нечётных по магнитному полю в различных средах, в которых существует электрический ток или поток тепла в направлении, перпендикулярном: 1) магнитному полю, 2) напряжённости электрического поля или градиенту температуры. Это эффект Холла, эффект Риги-Ледока в немагнитных металлах, аномальный эффект Холла в магнетиках, нечётный эффект Бинакера-Зенфглебена в молекулярных газах, фоновый эффект Холла в диэлектриках. Геометрическое тождество перечисленных явлений находится в контрасте с разнообразием механизмов их образования, динамических и диссипативных. Но во всех случаях поперечный к магнитному полю поток возникает благодаря спин-орбитальному взаимодействию носителей с магнитными моментами.*

Ключевые слова: эффект Холла, аномальный эффект Холла, спиновый эффект Холла, фоновый эффект Холла, эффект Риги-Ледока, эффект Бинакера-Зенфглебена

PACS numbers: 34.10.+x, 72.15.Gd, 72.15.Jf, 72.20.My, 72.20.Pa

DOI: 10.3367/UFN.0185.201505b.0479

### Содержание

1. Введение (479).
2. Эффект Холла в металлах (480).
3. Аномальный эффект Холла в ферромагнетиках (482).
4. Эффект Риги-Ледока (483).
5. Эффект Бинакера-Зенфглебена (483).
6. Фоновый эффект Холла (484).
7. Заключение (487).

Список литературы (487).

А. Ф. Барабанов, Институт физики высоких давлений им. Л. Ф. Верещагина РАН, Калужское шоссе 14, 142190 Троицк, Москва, Российская Федерация  
E-mail: abarab@bk.ru  
Ю. М. Каган, Т. В. Хабарова, Национальный исследовательский центр "Курчатовский институт", пл. Академика Курчатова 1, 123182 Москва, Российская Федерация  
E-mail: habarova\_TV@ncsk.ru  
Л. А. Максимов, Национальный исследовательский центр "Курчатовский институт", пл. Академика Курчатова 1, 123182 Москва, Российская Федерация; Московский физико-технический институт (государственный университет), Институтский пер. 9, 141700 Долгопрудный, Московская обл., Российская Федерация  
E-mail: lam05@mail.ru  
А. В. Михеенков, Институт физики высоких давлений им. Л. Ф. Верещагина РАН, Калужское шоссе 14, 142190 Троицк, Москва, Российская Федерация; Московский физико-технический институт (государственный университет), Институтский пер. 9, 141700 Долгопрудный, Московская обл., Российская Федерация  
E-mail: mikheenk@bk.ru

Статья поступила 1 марта 2015 г.

### 1. Введение

Эффект Холла — явление возникновения поперечной разности потенциалов (называемой также холловским напряжением) при помещении проводника с постоянным током в магнитное поле — был открыт Эдвином Холлом в 1879 г. в тонких пластинках золота [1]. Интересно, что в то время публикация работы даже в статусном журнале не означала невозможности её появления в других изданиях. Пионерская работа Холла "О новом действии магнита на электрические токи" ("On a New Action of the Magnet on Electric Currents") [1] была перепечатана в [2–4]. Статья [1], дальнейшие работы Эдвина Холла [5–14] и отклики на них [15–17] открывают библиографию эффекта Холла.

В металлах эффект возникает благодаря дрейфу электронов в скрещённых электрическом  $E$  и магнитном  $B$  полях. В магнетиках к эффекту приводит спин-орбитальное взаимодействие электронов проводимости и магнитных моментов. В диэлектриках магнитное поле изменяет поляризацию фононов и частоту их столкновений с магнитной подсистемой. В газах прецессия вращательных моментов в магнитном поле приводит к изменению вероятности столкновений несферических молекул. В настоящем обзоре мы рассмотрим случай слабых магнитных полей и квантовый эффект Холла не обсуждаем.

Согласно теории необратимых процессов Онзагера – Казимира, при малом отклонении от равновесия обобщённые потоки пропорциональны обобщённым силам [18]:

$$J_i = \sigma_{ik} X_k, \quad (1)$$

© А. Ф. Барабанов, Ю. М. Каган, Л. А. Максимов,  
А. В. Михеенков, Т. В. Хабарова 2015

# ПРИРОДА

## 5-07



## Как ток спины переносит



### Спинтроника многослойных ферромагнетиков

Ю.В.Гуляев, П.Е.Зильберман, Э.М.Эпштейн

Твердотельная электроника второй половины XX в. была основана на переносе заряда электронов и управлении им при помощи электрических и магнитных полей. В конце века возникло и стало быстро развиваться новое направление, активно использующее то обстоятельство, что электрон, помимо заряда, обладает спином и связанным с ним магнитным моментом. Это направление получило название «спиновая электроника», или «спинтроника», ему сопутствует смещение акцентов как в отношении основных изучаемых эффектов, так и в отношении используемых материалов. На первый план выходят ферромагнитные металлы. В «обычной», зарядовой, электронике металлам отводилась довольно пассивная роль из-за высокой концентрации свободных электронов, экранирующих электрические поля и исключающих возможность нарушать зарядовую нейтральность и управлять распределением заряда. Что касается магнитных полей, то их воздействие на движение электронов, будучи эффектом релятивистским (сила Лоренца пропорциональна отношению скорости заряда к скорости света), становится существенным лишь в достаточно сильных полях. Известные гальвано- и термомагнитные эффекты, обусловленные действием магнитного поля на движение свободных электронов



*Юрия Васильевич Гуляев, академик РАН, генеральный директор Института радиотехники и электроники им.В.А.Котельникова РАН. Область научных интересов — радиоэлектроника, физика полупроводников, физика магнитных явлений, акустоэлектроника, информатика, обработка сигналов. Лауреат Государственных премий СССР (1974, 1984), Государственной премии РФ (1993), премии Европейского физического общества (1979), премии Института электро- и радиоинженеров (IEEE) (2006) и др.*

*Петр Ефимович Зильберман, доктор физико-математических наук, заведующий лабораторией того же института. Занимается теорией полупроводников, физикой магнитных явлений, акустоэлектроникой, наноэлектроникой. Лауреат Государственной премии (1985).*

*Эрнест Маирович Эпштейн, доктор физико-математических наук, ведущий научный сотрудник того же института. Работы связаны с физикой полупроводников, физикой магнитных явлений, физической акустикой, исследованием низкоразмерных структур.*

© Гуляев Ю.В., Зильберман П.Е., Эпштейн Э.М., 2007

Спинтроника: обменное переключение ферромагнитных металлических переходов при малой плотности тока / Ю. В. Гуляев [и др.]. – Текст : непосредственный // Успехи физических наук. – 2009. – Т. 179, № 4. – С. 359–368 : 6 рис. – Библиогр.: с. 367–368 (30 назв.). – Имеется электронная версия печатной публикации. – URL: <https://ufn.ru/ru/articles/2009/4/b> (дата обращения: 10.02.2021). – Режим доступа: свободный. – ISSN 0042-1294.

Апрель 2009 г.

УСПЕХИ ФИЗИЧЕСКИХ НАУК

Том 179, № 4

ОБОЗРЫ АКТУАЛЬНЫХ ПРОБЛЕМ

## Спинтроника: обменное переключение ферромагнитных металлических переходов при малой плотности тока

Ю.В. Гуляев, П.Е. Зильберман, А.И. Панас, Э.М. Эпштейн

*Представлен обзор работ по обменному переключению ферромагнитных металлических переходов при малых пороговых плотностях тока. Радикальное (на порядки) уменьшение порога достигается при доминировании механизма инжекции неравновесных спинов током, оптимальном соотношении спиновых сопротивлений слоёв, а также при наложении внешнего магнитного поля вблизи порога ориентационного фазового перехода.*

PACS numbers: 72.25.Ba, 72.25.Hg, 75.47.–m

DOI: 10.3367/UFN.0179.200904b.0359

### Содержание

1. Введение (359).
  2. Поляризованный по спину ток (360).
  3. Гигантское магнетосопротивление. Спиновая инжекция (360).
  4. Вызываемое током  $\sigma$ -обменное переключение (361).
  5. Динамика намагниченностей  $m$  и  $M$  при наличии тока (362).
  6. Граничные условия в динамике релаксации (363).
  7. Приближение макроспина (364).
  8. Вызываемая током обменная неустойчивость намагниченности (364).
  9. Влияние внешнего магнитного поля на порог обменного переключения (366).
  10. Выводы (367).
- Список литературы (367).

### 1. Введение

С конца 1980-х годов за рубежом непрерывно нарастает поток исследований свойств наноразмерных структур на основе многослойных металлических ферромагнитных плёнок с гигантским магнетосопротивлением (ГМС). Подобные структуры демонстрируют необычные физи-

Ю.В. Гуляев, Институт радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН, ул. Моховая 11, корп. 7, 125009 Москва, Российская Федерация  
Тел. (495) 629-35-91  
E-mail: gulyaev@cplire.ru  
П.Е. Зильберман, А.И. Панас, Э.М. Эпштейн, Институт радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН, Фрязинский филиал, пл. Введенского 1, 141190 Фрязино, Московская обл., Российская Федерация  
Тел. (496) 565-26-18  
E-mail: zil@ms.ire.rssi.ru, eme253@ms.ire.rssi.ru

Статья поступила 5 ноября 2008 г.

ческие свойства в широком диапазоне температур, включая комнатные. Природа основных эффектов, таких как обменная неустойчивость и переключение током, оказывается достаточно новой и интересной. Эти эффекты находят применения в датчиках магнитного поля и тока, в головках считывания информации магнитных дисков и лент, считаются перспективными для применений в элементах памяти с высокой плотностью информации, гальванических развязках, биодатчиках. Ведутся разработки спиновых транзисторов, логических наноземлементов, магнитных нейронов и спиновых микропроцессоров. Оценки плотности размещения наноземлементов, в том числе элементов памяти, показывают, что их плотность может приближаться к "физическому" пределу порядка 100 Гбит см<sup>-2</sup>. Проведённые исследования показали, что ожидаемое быстроедействие достаточно велико, так что время одного переключения составляет ~ 0,1 нс и менее. Вполне вероятно, что подобные структуры окажутся в ближайшем будущем основой для следующего поколения вычислительных систем, обладающих принципиально новыми свойствами и существенно более высокими характеристиками по сравнению с существующими системами.

Становится очевидным, что мы столкнулись с важным научно-техническим направлением, в котором основным носителем информации оказывается спиновое состояние вещества, а новые эффекты, которые сопровождают перенос спина, могут быть применены для обработки этой информации. Для обозначения такого направления теперь укоренилось даже специальное название — спинтроника.

В этом понимании сфера спинтроника широка. Например, в обзоре Б.П. Захарчени и др. [1] были обсуждены ранние работы и показано, что поляризованный свет в полупроводниковых структурах влияет на спиновое состояние и приводит к ряду интересных эффектов. Добавление к этим структурам ферромагнитных слоёв

© Ю.В. Гуляев, П.Е. Зильберман, А.И. Панас, Э.М. Эпштейн 2009

Кусраев, Ю. Г. Спиновые явления в полупроводниках: физика и приложения / Ю. Г. Кусраев. – Текст : непосредственный // Успехи физических наук. – 2010. – Т. 180, № 7. – С. 759–773 : 12 рис. – Библиогр.: с. 772–773 (96 назв.). – Материалы научной сессии Отделения физических наук Российской академии наук. – Имеется электронная версия печатной публикации. – URL: <https://ufn.ru/ru/articles/2010/7/h> (дата обращения: 10.02.2021). – Режим доступа: свободный. – ISSN 0042-1294.

Июль 2010 г.

УСПЕХИ ФИЗИЧЕСКИХ НАУК

Том 180, № 7

КОНФЕРЕНЦИИ И СИМПОЗИУМЫ

## Спинтроника

Научная сессия Отделения физических наук Российской академии наук, 3 февраля 2010 г.

PACS number: 01.10.Fv

DOI: 10.3367/UFN.0180.201007g.0759

3 февраля 2010 г. в конференц-зале Физического института им. П.Н. Лебедева РАН состоялась научная сессия Отделения физических наук РАН.

Объявленная на web-сайте ОФН РАН [www.grad.ac.ru](http://www.grad.ac.ru) повестка заседания содержала следующие доклады:

1. Устинов В.В. (Институт физики металлов УрО РАН, Екатеринбург). *Металлическая наноспинтроника.*
2. Кусраев Ю.Г. (Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН, Санкт-Петербург). *Спиновые явления в полупроводниках: физика и приложения.*
3. Тарасенко С.А. (Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН, Санкт-Петербург). *Спиновые фототоки в полупроводниках.*
4. Аверкиев Н.С., Голуб Л.Е. (Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН, Санкт-Петербург). *Спиновая релаксация в квантовых полупроводниковых гетероструктурах.*

Статьи, написанные на основе докладов 2–4, публикуются ниже.

PACS numbers: 75.47.–m, 75.76.+j, 85.75.–d  
DOI: 10.3367/UFN.0180.201007h.0759

## Спиновые явления в полупроводниках: физика и приложения

Ю.Г. Кусраев

### 1. Введение

Спиновые явления привлекают большое внимание с момента появления гипотезы спина, выдвинутой в 1925 г. голландскими физиками Самуэлем Гаудемитом и Джорджем Уленбеком. Концепция спина быстро завоевала признание, так как она разрешила затруднения, имевшиеся в то время в спектроскопии, — объяснение эффекта Зеемана и тонкой структуры спектральных линий. Наиболее информативным методом исследования спиновых явлений в атомах и полупроводниках, по видимому, является оптическая ориентация спинов.

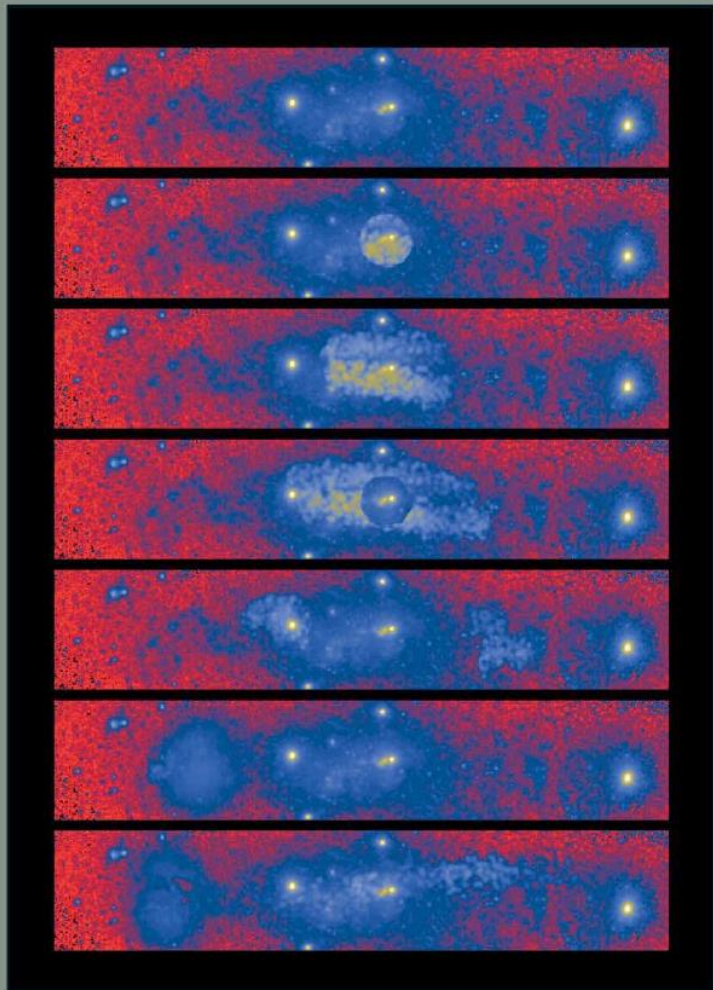
Ю.Г. Кусраев, Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН, Санкт-Петербург, РФ  
E-mail: kusrayev@orient.ioffe.ru

Открытие оптической ориентации спинов в атомах относят к 1924 г., когда Вильгельмом Ханле [1] были объяснены знаменитые опыты Роберта Вуда [2] по влиянию магнитного поля на поляризованную люминесценцию паров некоторых металлов. Общие принципы явления были установлены в начале 1950-х годов французской группой А. Кастлера [3]. За эти исследования в 1966 г. А. Кастлеру была присуждена Нобелевская премия по физике ("за открытие и разработку оптических методов исследования резонансов Герца в атомах"). В 1968 г. Ж. Лампель [4] впервые продемонстрировал возможность оптической ориентации спинов электронов проводимости в полупроводниках (Si) и наблюдения ориентации методом ядерного магнитного резонанса (ЯМР). Годом позднее оптическая ориентация электронов проводимости наблюдалась в полупроводнике GaSb по поляризации люминесценции [5]. С этого времени начались интенсивные исследования спин-зависимых явлений в полупроводниках; результаты этих исследований опубликованы в коллективной монографии [6].

Одновременно с обнаружением оптической ориентации была осознана фундаментальная и практическая важность исследований генерации и детектирования спина электрическими методами. В 1971 г. М.И. Дьяконовым и В.И. Перелом был предсказан спиновый эффект Холла — возникновение спинового потока в направлении, перпендикулярном электрическому току [7]. Экспериментально генерация спина электрическим током впервые была продемонстрирована в работе [8]. В 1976 г. А.Г. Аронов и Г.Е. Пикус высказали идею создания неравновесной спиновой поляризации в полупроводнике при пропускании тока через ферромагнитный контакт с полупроводником [9] (спиновая инжекция). Экспериментально спиновая инжекция в GaAs была реализована Альварадо и Рено [10].

В середине 1990-х годов в спиновой физике произошёл новый всплеск, вызванный идеей использования спиновых степеней свободы в устройствах хранения и обработки информации. Электронный спин, находящийся в суперпозиции базисных состояний  $-1/2$  и  $+1/2$ , является квантовым аналогом классического бита информации. Такой *квантовый бит (кубит)* может быть использован в различных устройствах спиновой логики. Возник термин "квантовый компьютер" — устройство, которое обрабатывает информацию, представленную в виде набора не битов, а кубитов. Физическими носителями кубитов,

© Ю.Г. Кусраев 2010



## Физика взаимодействия сверхпроводимости и магнетизма

А.И.Буздин<sup>1</sup>, А.С.Мельников<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Университет Бордо (Бордо, Франция)

<sup>2</sup>Институт физики микроструктур РАН (Нижний Новгород, Россия)

В последние годы активно развивается направление физики сверхпроводимости, связанное с экспериментальными и теоретическими работами по исследованию взаимодействия сверхпроводящего и магнитного упорядочений в различных системах. Оригинальные идеи по этой проблеме были высказаны В.Л.Гинзбургом в одной из его пионерных работ в 50-х годах прошедшего века. Электродинамический и обменный механизмы взаимодействия магнетизма и сверхпроводимости приводят к новым интересным эффектам в естественных ферромагнитных сверхпроводниках и искусственных гибридных структурах. Присутствие доменной структуры в ферромагнетике существенно модифицирует структуру сверхпроводящего состояния. Интерес к таким системам вызван как очевидной важностью фундаментальной проблемы конкуренции различных типов упорядочения в физике конденсированных сред, так и возможностью использования гибридных структур сверхпроводник–ферромагнетик для создания прототипов устройств сверхпроводящей спинтроники, таких как спинные вентили, сверхпроводящие каналы управляемой геометрии или джозефсоновские контакты со спонтанной разностью сверхпроводящих фаз. Идея использования данных структур для элементной базы криоэлектроники заключается в возможности управления критической температурой сверхпроводящего перехода и сверхпроводящими токами путем изменения магнитного состояния ферромагнитной подсистемы.

**Ключевые слова:** сверхпроводимость, ферромагнетизм, спинтроника, куперовские пары, обменное поле.

Впервые проблема сосуществования сверхпроводимости и магнетизма была теоретически сформулирована в статье В.Л.Гинзбурга в «Журнале экспериментальной и теоретической физики» в 1956 г. [1]. Взаимный антагонизм этих двух явлений очевидным образом следует уже из фундаментального свойства сверхпроводящего состояния металлов, получившего название эффекта Мейсснера, — способности выталкивать магнитное поле. Незатухающие токи сверхпроводящих электронов, которые отвечают при этом за экранировку внешних магнитных полей, в свою очередь, оказывают разрушающее влияние на саму сверхпроводимость: она исчезает при превышении некоторого критического значения приложенного магнитного поля. Любой магнитный материал представляет собой естест-



**Александр Иванович Буздин**, доктор физико-математических наук, профессор Университета Бордо (Франция). Занимается теорией сверхпроводимости, магнетизма, гетероструктур. Лауреат франко-английской премии Холвека (Holweck Prize and a gold medal, 2013), иностранный член Академии Ломбардии (Италия), кавалер французского Ордена Академических пальм (Ordre des Palmes académiques) — за заслуги в образовании и науке.



**Александр Сергеевич Мельников**, доктор физико-математических наук, заведующий лабораторией теории мезоскопических систем Института физики микроструктур РАН (Нижний Новгород). Область научных интересов — сверхпроводимость, квантовый транспорт, мезоскопия.

Спинтроника полупроводниковых, металлических, диэлектрических и гибридных структур: (к 100-летию Физико-технического института имени А. Ф. Иоффе РАН) / П. Г. Баранов [и др.]. – Текст : непосредственный // Успехи физических наук. – 2019. – Т. 189, № 8. – С. 849–880 : 20 рис. – Библиогр.: с. 878–880 (206 назв.). – Имеется электронная версия печатной публикации. – URL: <https://ufn.ru/ru/articles/2019/8/d> (дата обращения: 10.02.2021). – Режим доступа: свободный. – ISSN 0042-1294.

Август 2019 г.

## УСПЕХИ ФИЗИЧЕСКИХ НАУК

Том 189, № 8

### ОБОРЫ АКТУАЛЬНЫХ ПРОБЛЕМ

## Спинтроника полупроводниковых, металлических, диэлектрических и гибридных структур

(к 100-летию Физико-технического института им. А.Ф. Иоффе РАН)

П.Г. Баранов, А.М. Калашникова, В.И. Козуб, В.Л. Корнев,  
Ю.Г. Курсаев, Р.В. Писарев, В.Ф. Сапега,  
И.А. Акимов, М. Байер, А.В. Щербаков, Д.Р. Яковлев

Требования к миниатюризации, увеличению быстродействия и энергоэффективности электронных устройств привели к зарождению и бурному развитию спиновой электроники, или спинтроники. Рассмотрено несколько актуальных направлений экспериментальных и теоретических исследований, в которых активно участвует Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН (ФТИ). Обсуждаются достигнутый к настоящему времени прогресс в создании полупроводниковых и гибридных структур, проявляющих заданные магнитные свойства, в разработке методов манипуляции одиночными спинами, теоретическом описании переключения намагниченности металлических гетероструктур электрическим полем, а также в сверхбыстром управлении намагниченностью посредством воздействия на магнитную анизотропию фемтосекундными лазерными импульсами.

**Ключевые слова:** спиновая поляризация, спиновый транспорт, ферромагнитный эффект близости, оптический детектируемый магнитный резонанс, лазерно-индуцированная сверхбыстрая динамика намагниченности, одиночные спины, спин-ориентационные переходы, магнитная анизотропия, развалённые магнитные полупроводники, ферромагнетики, ферримагнетики

PACS numbers: 75.30.Kz, 75.50.Bb, 75.50.Gg, 75.76.+j, 75.78.Jr, 76.70.Nb, 78.30.Fs, 78.55.Et, 85.75.–d

DOI: <https://doi.org/10.3367/UFN.2018.11.038486>

### Содержание

#### 1. Введение (849).

#### 2. Горячая фотоломисценция и неупругое рассеяние света с перевернутым спином в развалённых магнитных полупроводниках (851).

2.1. Развалённые магнитные полупроводники. 2.2. Поляризованная горячая фотоломисценция в (Ga, Mn)As. 2.3. Горячая фотоломисценция в (Ga, Mn)As под влиянием одноосных статических деформаций. 2.4. Спиновая релаксация в (Ga, Mn)As.

#### 3. Ферромагнитный эффект близости в гибридной структуре ферромагнетик–полупроводник (856).

3.1. Равновесный эффект близости. Поляризация газа дырок в обменном поле ферромагнетика. 3.2. Дальнедействующий равновесный эффект близости. Непрямой обмен ферромагнетик–

полупроводник через эллиптически поляризованные фононы. 3.3. Динамический эффект близости. Поляризация электронов при спин-зависимом захвате ферромагнетиком электронов из квантовой ямы.

#### 4. От манипуляции спиновыми ансамблями к манипуляциям одиночными спинами в условиях окружающей среды (859).

#### 5. Переключение намагниченности в ферромагнитных наногетероструктурах электрическими импульсами (863).

5.1. Переключение спин-поляризованным током. 5.2. Переключение под влиянием электрического поля на непрямой обмен. 5.3. Бестоковое переключение, обусловленное влиянием электрического поля на непрямой обмен в условиях кулоновской блокады. 5.4. Сверхбыстрое переключение намагниченности в ферримагнитных структурах.

#### 6. Сверхбыстрое оптическое управление анизотропией и динамические явления в магнитных структурах (869).

6.1. Лазерно-индуцированное изменение магнитной анизотропии и прецессия намагниченности. 6.2. Механизмы изменения магнитной анизотропии. 6.3. Сверхбыстрое изменение анизотропии и спинтронные явления.

#### 7. Заключение (877).

#### Список литературы (878).

### 1. Введение

Спиновая электроника — спинтроника [1] — призвана решить проблему обработки и передачи информации не с

© П.Г. Баранов, А.М. Калашникова, В.И. Козуб, В.Л. Корнев, Ю.Г. Курсаев, Р.В. Писарев, В.Ф. Сапега, И.А. Акимов, М. Байер, А.В. Щербаков, Д.Р. Яковлев 2019

Диэлектрическая магноника — от гигагерцев к терагерцам / С.А. Никитов, А.Р. Сафин, Д.В. Калябин [и др.]: непосредственный // Успехи физических наук. – 2020. – Т. 190, № 10. – С. 1009–1040: 31 рис. – Библиогр.: с. 1037–1040 (348 назв.). – Имеется электронная версия печатной публикации. – URL: <https://ufn.ru/ru/articles/2020/10/a> (дата обращения: 10.02.2021). – Режим доступа: свободный. – ISSN 0042-1294.

Октябрь 2020 г.

## УСПЕХИ ФИЗИЧЕСКИХ НАУК

Том 190, № 10

### ОБОРЫ АКТУАЛЬНЫХ ПРОБЛЕМ

## Диэлектрическая магноника — от гигагерцев к терагерцам

С.А. Никитов, А.Р. Сафин, Д.В. Калябин, А.В. Садовников,  
Е.Н. Бегинин, М.В. Логунов, М.А. Морозова, С.А. Одинцов,  
С.А. Осокин, А.Ю. Шараевская, Ю.П. Шараевский, А.И. Кирилук

Представлен обзор современного состояния исследований в области диэлектрической магноники и магнитной спинтроники. Описаны теоретические и экспериментальные методы исследования физических процессов и расчёта параметров магнитных микро- и наноструктур. Рассмотрены основные понятия магнитной спинтроники, физические эффекты, на которых она основана, а также перспективы её применения для систем обработки, передачи и приёма информационных сигналов. Особое внимание уделено возможности повышения рабочих частот магнитных устройств от гигагерцевого частотного диапазона до терагерцевого. Обсуждаются конкретные реализации элементной базы магноники, а также пути их дальнейшего развития.

**Ключевые слова:** магноника, спинтроника, спин-волновая электроника, магнитные кристаллы, СВЧ-электроника, магнитные структуры, спиновые волны, волноводы, магнитные плёнки, магнитная логика, устройства обработки информации

PACS numbers: 85.70.–w, 85.75.–d

DOI: <https://doi.org/10.3367/UFN.2019.07.038609>

### Содержание

#### 1. Введение (1009).

#### 2. Теоретические сведения о диэлектрической магнонике (1010).

2.1. Базовые конструкции магнитных устройств обработки сигналов. 2.2. Математические методы описания магнитных структур. 2.3. Спиновые эффекты в магнитных структурах. 2.4. Топологическая магноника. 2.5. Многослойные магнитные гетероструктуры.

#### 3. Экспериментальные методы исследования диэлектрических магнитных структур (1023).

#### 4. Магнитные кристаллы (1024).

С.А. Никитов<sup>(1,2,3,a)</sup>, А.Р. Сафин<sup>(1,4,b)</sup>, Д.В. Калябин<sup>(1,2,c)</sup>, А.В. Садовников<sup>(1,3,d)</sup>, Е.Н. Бегинин<sup>(3,e)</sup>, М.В. Логунов<sup>(1,f)</sup>, М.А. Морозова<sup>(3,g)</sup>, С.А. Одинцов<sup>(3,h)</sup>, С.А. Осокин<sup>(1,2,i)</sup>, А.Ю. Шараевская<sup>(1)</sup>, Ю.П. Шараевский<sup>(3,j)</sup>, А.И. Кирилук<sup>(1,5)</sup>

<sup>(1)</sup> Институт радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН, ул. Моховая 11/7, 125009 Москва, Российская Федерация

<sup>(2)</sup> Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет), Институтский пер. 9, 141701 Долгопрудный, Московская обл., Российская Федерация

<sup>(3)</sup> Саратовский государственный университет им. Н.Г. Чернышевского, ул. Астраханская 83, 410012 Саратов, Российская Федерация

<sup>(4)</sup> Национальный исследовательский университет МЭИ, ул. Красноказарменная 14, 111250 Москва, Российская Федерация

<sup>(5)</sup> FELIX Laboratory, Radboud University, 6525, ED Nijmegen, Netherlands

E-mail: <sup>(a)</sup> nikitov@eplire.ru, <sup>(b)</sup> arsa@inf@gmail.com, <sup>(c)</sup> dmitry.kalyabin@phystech.edu, <sup>(d)</sup> sadovnikovav@gmail.com, <sup>(e)</sup> ebgegin@gmail.com, <sup>(f)</sup> logunovmv@bk.ru, <sup>(g)</sup> mamorozovama@yandex.ru, <sup>(h)</sup> odinoff@gmail.com, <sup>(i)</sup> osokinserg@gmail.com, <sup>(j)</sup> sharaevskyy@info.sgu.ru

Статья поступила 6 июня 2019 г., после доработки 5 июля 2019 г.

#### 5. Магнитные волноводные структуры типа феррит–полупроводник (1027).

#### 6. Доменные границы и скирмионы в устройствах магноники (1030).

#### 7. Магнитные осцилляторы и детекторы (1033).

#### 8. Терагерцевая магноника (1034).

#### 9. Заключение. Перспективы применения и открытые проблемы (1037).

#### Список литературы (1037).

### 1. Введение

Прошло более трёх лет с момента опубликования в журнале *Успехи физических наук* нашего обзора [1], посвящённого магнонике как новому научному направлению в спинтронике и спин-волновой электронике. За эти годы число публикаций в данной области стремительно возросло в связи с высокой научной активностью и развитием технологий, позволяющих создавать новые материалы и структуры для исследования новых физических явлений и формирования новой компонентной базы на основе магноники. В эти же годы появилось несколько обзоров в основном в англоязычных журналах, посвящённых отдельным разделам магноники и спинтронике, в частности антиферромагнитной спинтронике [2, 3], новому направлению в спинтронике — стрейнтронике [4, 5], фундаментальным проблемам создания элементной базы нового вида памяти для нейроморфных систем [6, 7], магнитным кристаллам с фокусировкой на обработку информационных сигналов [8].

В то же время многие другие вопросы, связанные с исследованиями в области магноники, остались вне обсуждения. Кроме того, в перечисленных обзорах в основном обсуждались результаты, полученные авторами этих обзоров. В настоящем обзоре мы хотим рассмотреть расширенный круг опубликованных результатов в стиле нашего предыдущего обзора, описать недавно воз-

© С.А. Никитов, А.Р. Сафин, Д.В. Калябин, А.В. Садовников, Е.Н. Бегинин, М.В. Логунов, М.А. Морозова, С.А. Одинцов, С.А. Осокин, А.Ю. Шараевская, Ю.П. Шараевский, А.И. Кирилук 2020



# РОССИЙСКИЙ ХИМИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ

ЖУРНАЛ РОССИЙСКОГО  
ХИМИЧЕСКОГО ОБЩЕСТВА  
ИМ. Д.И.МЕНДЕЛЕЕВА

ТОМ  
LIII

2  
2009

НАНОМАТЕРИАЛЫ:  
СОСТОЯНИЕ И ПЕРСПЕКТИВЫ

ISSN 0373—0247

- 9 июль 2009

Моргунов, Р. Б. Наноструктуры ферромагнитных полупроводников – будущее спинтроники / Р. Б. Моргунов, А. И. Дмитриев. – Текст : непосредственный // Российский Химический Журнал (ЖРХО им. Д. И. Менделеева). – 2009. – Т. 53, № 2. – С. 36-46. – Библиогр.: с. 45-46 (110 назв.). – Имеется электронная версия печатной публикации. – URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=13536107> (дата обращения: 10.02.2021). – Режим доступа: свободный. – ISSN 0373-0247.

Р. Б. Моргунов, А. И. Дмитриев

УДК 537.6

## Наноструктуры ферромагнитных полупроводников — будущее спинтроники

Р. Б. Моргунов, А. И. Дмитриев

*РОМАН БОРИСОВИЧ МОРГУНОВ — доктор физико-математических наук, профессор, ведущий научный сотрудник Института проблем химической физики РАН (ИПХФ РАН). Область научных интересов: спин-зависимые процессы в твердых телах, физика молекулярных магнетиков, спинтроника, ступенчатая микромеханика, пластичность и прочность кристаллов, фотомангнитные эффекты.*

*АЛЕКСЕЙ ИВАНОВИЧ ДМИТРИЕВ — кандидат физико-математических наук, научный сотрудник ИПХФ РАН. Область научных интересов: магнитные свойства молекулярных магнетиков и наноструктур ферромагнитных полупроводников.*

142432 Московская область, Черноголовка, просп. Акад. Н.Н. Семёнова, 1, Институт проблем химической физики РАН, тел. 8(49652)2-19-11, E-mail [morgunov20062006@yandex.ru](mailto:morgunov20062006@yandex.ru)

### Введение

В современной электронике используются полупроводниковые материалы, функционирование которых обеспечивается зарядом электрона. Возрастающие требования к характеристикам приборов электроники ставят задачу поиска и внедрения в практику альтернативных материалов, работающих на неклассических принципах. Основой электроники будущего могут стать приборы спинтроники, в работе которых помимо заряда электрона участвует его спин.

Впервые о спинтронике заговорили в 1988 году после открытия эффекта гигантского магнетосопротивления [1, 2] (за открытие этого эффекта авторам была присуждена Нобелевская премия по физике в 2007 году). Эффект гигантского магнетосопротивления обусловлен неодинаковым рассеянием на ферромагнитных примесях двух групп электронов, различающихся ориентацией спинов «вверх» и «вниз». Для реализации этого отбора необходимо, чтобы средние длины свободного пробега существенно различались для электронов с направлениями спинов «вверх» и «вниз». Такая ситуация реализуется в ферромагнитных материалах, в которых вследствие обменного расщепления  $3d$ -зоны возникают различия в плотности занятых состояний электронов со спинами «вверх» и «вниз». На этом принципе основаны магниторезистивные приборы, реализующие эффекты гигантского и туннельного магнетосопротивления [3—9].

Прогресс в области создания средств обработки информации непосредственно связан с развитием технологии хранения данных. К революционным достижениям в этой области можно отнести создание MRAM-чипов (Magnetic Random-Access Memory) [10]. В MRAM каждая ячейка, представляющая собой область ферромагнитного материала нанометрового

размера, может являться битом памяти. Считывание информации в MRAM основано на эффекте гигантского или туннельного магнетосопротивления. К управляющим шинам MRAM (рис. 1) прикладывается разность потенциалов, и если направление намагниченности управляемого ферромагнитного слоя совпадает с направлением намагниченности фиксированного ферромагнитного слоя, то туннельный ток течет через диэлектрический слой. В случае противоположных направлений намагниченности туннельный ток отсутствует. MRAM по всем параметрам превосходит все существующие типы памяти. В настоящее время уже имеются образцы MRAM емкостью 4 Мбит с длительностью считывания 25 нс.

В качестве MRAM в перспективе можно будет использовать массивы упорядоченных ферромагнитных нанопроволок при условии, что они имеют высокую температуру Кюри. В этом случае плотность ячеек памяти увеличится на три порядка. Из наноструктур функционального назначения в работах [11—14] были исследованы нанопроволоки  $\text{Ge}_{1-x}\text{Mn}_x$  ( $x$  — доля атомов магнитной примеси), ферромагнитные при комнатной температуре.

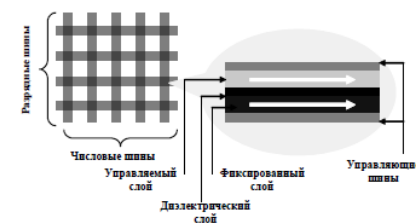


Рис. 1. Схема MRAM



Ратников, П. В. Двумерная графеновая электроника: современное состояние и перспективы // П. В. Ратников, А. П. Силин. – DOI: 10.3367/UFNr.2017.11.038231 – Текст : непосредственный // Успехи физических наук. – 2018. – Т. 188, № 12. – С. 1249–1287 : 41 рис. – Библиогр.: с. 1282–1287 (666 назв.). – Имеется электронная версия печатной публикации. – URL: <https://ufn.ru/ru/articles/2018/12/a> (дата обращения: 10.02.2021). – Режим доступа: свободный. – ISSN 0042-1294.

Декабрь 2018 г.

УСПЕХИ ФИЗИЧЕСКИХ НАУК

Том 188, № 12

ОБОЗРЫ АКТУАЛЬНЫХ ПРОБЛЕМ

## Двумерная графеновая электроника: современное состояние и перспективы

П. В. Ратников, А. П. Силин

*Представлен обзор современного состояния в области применения двумерного углеродного материала графена в электронике с нанометровыми элементами — наноэлектронике. Кратко описана история получения графена. Дан обзор теоретических работ, посвящённых графеновым гетероструктурам. Основное внимание уделено практическому использованию графена в наноэлектронике. Рассмотрены перспективы графеновой и постграфеновой наноэлектроники.*

**Ключевые слова:** графен, наноэлектроника, гетероструктуры, транзисторы, диоды, сенсоры, интегральные схемы  
PACS numbers: 68.65.Cd, 68.65.Pq, 73.21.Fg, 73.40.Gk, 73.50.–h, DOI: <https://doi.org/10.3367/UFNr.2017.11.038231>  
85.30.Tv, 85.40.–e, 85.60.–q, 85.65.+h

### Содержание

1. Введение (1249).
  2. Свойства графена (1250).
  3. Графеновые гетероструктуры (1252).  
3.1. Слоистые гетероструктуры. 3.2. Латерально наноструктурированные нан-деривативы гетероструктуры. 3.3. Планарные гетероструктуры.
  4. Графеновая наноэлектроника (1259).  
4.1. Транзисторы. 4.2. Диоды. 4.3. Ячейки памяти. 4.4. Интегральные схемы. 4.5. Батареи. 4.6. Суперконденсаторы. 4.7. Термоэлектрические устройства. 4.8. Солнечные элементы. 4.9. Фотодетекторы. 4.10. Сенсоры.
  5. Перспективы графеновой и постграфеновой наноэлектроники (1280).
  6. Заключение (1281).
- Список литературы (1282).

### 1. Введение

Середина XX века и вся его вторая половина ознаменовались бурным развитием полупроводниковых технологий. Это привело к громадному прогрессу в электронике, главным образом на основе кремния. Создание транзистора в 1947 г. стало эпохальным событием<sup>1</sup>. На смену громоздким и энергозатратным вакуумным лампам в электронику пришли новые устройства относительно малых размеров и менее энергозатратные — транзи-

сторы [1–4]. Помимо этого, транзисторы привлекались такими свойствами, как отсутствие хрупких деталей, миниатюрность, большой срок работы. Транзистор интересен не только и не столько тем, что может заменить радиолампу, а своими уникальными свойствами, которыми в принципе не обладает радиолампа [5]. За исследования полупроводников и открытие транзисторного эффекта Дж. Бардину, У. Браттейну и У. Шокли была присуждена Нобелевская премия по физике за 1956 г.

Первая микросхема была создана Дж. Килби с сотрудниками в 1958 г. Они разработали технологию, которая совершила переворот в электронной промышленности. Как основа аналоговых схем, работающих в режиме пропорционального (прямого) усиления тока, были изготовлены радиочастотный генератор с фазовым сдвигом и триггер [6]. Впрочем, в последние три десятилетия аналоговые схемы активно вытесняются цифровыми, использующими лишь два крайних состояния — полностью открыт ("включено") и полностью закрыт ("выключено"), которым соответствуют значения 1 и 0 [7].

Нобелевская премия за 2000 г. была присуждена Дж. Килби "за вклад в изобретение интегральных схем" [6], а также Ж.И. Алфёрову и Г. Крёмеру "за разработку полупроводниковых гетероструктур, используемых в высокочастотной электронике и оптоэлектронике" [8, 9].

В 1953 г. Ж.И. Алфёров принял активное участие в создании первого советского транзистора на p–n–

<sup>1</sup> Историческая справка: фактическое создание транзистора произошло в середине декабря 1947 г., презентация транзистора для сотрудников Bell Labs состоялась 23 декабря 1947 г.; приоритет транзисторного патента датирован 17.06.1948, а публичная презентация транзистора состоялась 30 июня 1948 г. [1–4]. Так что истории науки и техники справедливо называют годом создания транзистора как 1947, так и 1948 гг.

П. В. Ратников, Институт общей физики им. А. М. Прохорова РАН, ул. Вавилова 38, 119991 Москва, Российская Федерация  
E-mail: ratnikov@iifi.ru

А. П. Силин, Физический институт им. П. Н. Лебедева РАН, Ленинский просп. 53, 119991 Москва, Российская Федерация  
E-mail: a.p.silin@mail.ru

Статья поступила 8 августа 2017 г., после доработки 20 октября 2017 г.

Бухараев, А. А. Стрейтроника — новое направление микро- и наноэлектроники и науки о материалах // А. А. Бухараев, П. В. Ратников, А. П. Силин. – DOI: 10.3367/UFNr.2018.01.038279 – Текст : непосредственный // Успехи физических наук. – 2018. – Т. 188, № 12. – С. 1288–1330 : 50 рис. – Библиогр.: с. 1327–1330 (290 назв.). – Имеется электронная версия печатной публикации. – URL: <https://ufn.ru/ru/articles/2018/12/b> (дата обращения: 10.02.2021). – Режим доступа: свободный. – ISSN 0042-1294.

Декабрь 2018 г.

УСПЕХИ ФИЗИЧЕСКИХ НАУК

Том 188, № 12

ОБОЗРЫ АКТУАЛЬНЫХ ПРОБЛЕМ

## Стрейтроника — новое направление микро- и наноэлектроники и науки о материалах

А. А. Бухараев, А. К. Звездин, А. П. Пятаков, Ю. К. Фетисов

*Стрейтроникой (straintronics) называют новое направление в физике конденсированного состояния, использующее методы деформационной инженерии и физические эффекты, наведённые механическими деформациями в твёрдых телах, для реализации нового поколения устройств информационных, сенсорных и энергосберегающих технологий. Рассмотрены основные понятия стрейтроники, физические эффекты, на которых она основана, её преимущества перед традиционной электроникой и стоящие перед ней проблемы и фундаментальные ограничения. Особое внимание уделено стрейтронике магнитных и магнитоэлектрических материалов, так как с ней связывают надежды на радикальное снижение энергопотребления при проведении компьютерных вычислений. На конкретных примерах рассмотрены практические применения принципов стрейтроники в области информационных и энергосберегающих технологий, сенсорной и сверхвысокочастотной техники.*

**Ключевые слова:** деформационная инженерия, магнитоупругое взаимодействие, магнитоэлектрические композиции, мультиферройки

PACS numbers: 75.80.+q, 75.85.+t

DOI: <https://doi.org/10.3367/UFNr.2018.01.038279>

### Содержание

1. Стрейтроника: основные понятия (1288).  
1.1. Введение. 1.2. Перекрёстные эффекты с участием упругой подсистемы. 1.3. Деформационная инженерия. 1.4. Композиционные материалы магнитной стрейтроники. 1.5. Принцип действия магнитных стрейтронных устройств.
2. Физические эффекты в магнитных микро- и наночастицах и структурах, индуцированные механическими напряжениями (1296).  
2.1. Переключение намагниченности в частях. 2.2. Изменения микромагнитной структуры под действием механических напря-

- жений. 2.3. Магнитные превращения, наведённые механическими напряжениями. 2.4. Термоиндуцированный магнитоупругий эффект. 2.5. Преобразование полей в композитивных структурах.
3. Композитные материалы и устройства магнитной стрейтроники (1315).  
3.1. Состав и методы изготовления структур. 3.2. Устройства памяти и логики, переключаемые электрическим полем. 3.3. Датчики, преобразователи энергии, микродвигатели. 3.4. Устройства обработки радиосигналов, перестраиваемые электрическим полем. 3.5. Производные элементы стрейтроник: гираторы, транзисторы и нейроморфные элементы.

4. Заключение (1326).
- Список литературы (1327).

### 1. Стрейтроника: основные понятия

#### 1.1. Введение

Стремительное и всё ускоряющееся развитие информационных технологий, выразившееся в последнее время в появлении таких новых областей, как Большие данные (Big Data) и цепочки блоков данных (blockchain), предполагают дальнейшее увеличение мощности вычислительных устройств. По оценкам специалистов [1], при сохранении тех же темпов роста информационных технологий и неизменных характеристиках электронных элементов к 2030 г. до половины потребляемой человечеством электроэнергии будет приходиться на вычисления, что в абсолютном выражении превышает отметку годового потребления в 10 ПВт ч. Данная ситуация стимулирует поиск новых энергосберегающих технологий обработки информации, одной из которых призвана стать стрейтроника.

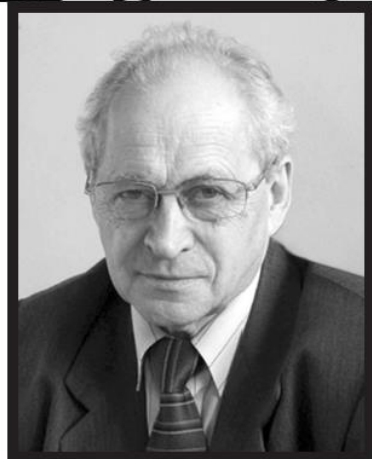
А. А. Бухараев, Казанский физико-технический институт им. Е. К. Завойского, Федеральный исследовательский центр "Казанский научный центр РАН", ул. Сибирский тракт 107, 420029 Казань, Российская Федерация  
E-mail: a\_bukharaev@kftik.ncnu

А. К. Звездин, Институт общей физики им. А. М. Прохорова РАН, ул. Вавилова 38, 119991 Москва, Российская Федерация  
Физический институт им. П. Н. Лебедева РАН, Ленинский просп. 53, 119991 Москва, Российская Федерация  
Московский физико-технический институт (государственный университет), Институтский пер. 9, 141710 Долгопрудный, Московская обл., Российская Федерация  
E-mail: zvezdin@gmail.com

А. П. Пятаков, Московский государственный университет им. М. В. Ломоносова, физический факультет, Ленинские горы 1, стр. 2, 119991 Москва, Российская Федерация  
E-mail: pyatkov@physics.msu.ru  
Ю. К. Фетисов, МИРЭА — Российский технологический университет, просп. Вернадского 78, 119454 Москва, Российская Федерация  
E-mail: fetisov@mirea.ru

Статья поступила 17 сентября 2017 г., после доработки 15 января 2018 г.

# Прикладная Нелинейная Динамика



Дмитрий Иванович Трубецков  
(14 июня 1938 – 12 августа 2020)



## Численное моделирование распространения магнитостатических волн в связанных магнитных кристаллах меандрового типа

А. Ю. Шараевская<sup>1</sup>, П. А. Попов<sup>2,3</sup>, С. А. Осокин<sup>2,3</sup>

<sup>1</sup>Саратовский национальный исследовательский государственный университет имени Н.Г. Чернышевского  
Россия, 410012 Саратов, ул. Астраханская, 83

<sup>2</sup>Институт радиотехники и электроники имени В.А.Котельникова РАН  
Россия, 125009 Москва, ул. Моховая, 11, корп. 7

<sup>3</sup>Московский физико-технический институт  
Россия, 141701, Московская область, г. Долгопрудный, Институтский пер., 9  
E-mail: upark@inbox.ru, paavali.popov@gmail.com, osokinserg@gmail.com

Автор для переписки Шараевская Анна Юрьевна, upark@inbox.ru

Поступила в редакцию 17.03.2020, принята к публикации 24.06.2020, опубликована 31.08.2020

**Цель** работы состоит в обобщении результатов численных исследований для связанных магнитных меандровых структур в случае распространения в таких структурах разных типов магнитостатических волн. **Методы.** Для решения поставленных задач использовались два известных метода – конечных элементов и конечных разностей для связанных ферромагнитных структур. Для численного решения методом конечных элементов в магнитостатическом приближении использовались уравнения магнитостатики, полученные из уравнений Максвелла. Для расчета внутренних эффективных полей было проведено микромагнитное моделирование с привлечением метода конечных разностей. **Результаты.** Проведены исследования особенностей распространения магнитостатических спиновых волн в связанных периодических сложных структурах в виде двух связанных меандровых магнитных кристаллов, разделенных диэлектрическим слоем, на основе численного моделирования методом конечных элементов. Показано, что используемый метод позволяет получить дисперсионные уравнения для поверхностных, прямых объемных и обратных объемных магнитостатических волн, распространяющихся в таких структурах, и выявить основные особенности дисперсионных характеристик этих волн. **Заключение.** Показано, что при определенных условиях в спектрах появляются запрещенные зоны, обусловленные брэгговским отражением и сложной структурой магнитного волновода. Ширина и положение этих запрещенных зон зависит от параметров магнитных пленок, их геометрических размеров и направления постоянного магнитного поля. Полученные результаты могут быть реализованы при создании на основе магнитных кристаллов частотно-избирательных устройств для селективной обработки информационных сигналов в СВЧ-диапазоне.

**Ключевые слова:** магнитный кристалл, магнитостатическая волна, микроволновый диапазон, запрещенная зона.

**Образец цитирования:** Шараевская А.Ю., Попов П.А., Осокин С.А. Численное моделирование распространения магнитостатических волн в связанных магнитных кристаллах меандрового типа // Известия вузов. ПНД. 2020. Т. 28, № 4. С. 425–434. <https://doi.org/10.18500/0869-6632-2020-28-4-425-434>

Статья опубликована на условиях лицензии Creative Commons Attribution License (CC-BY 4.0).

**Финансовая поддержка.** Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проекты № 18-37-00373, № 18-37-20048), а также гранта Президента РФ (№ МК-3607.2019.9).

Wolf, S. A. Spintronics: A spin-based electronics vision for the future / AS. A. Wolf, D. D. Awschalom, R. A. Buhrman, J. M. Daughton, S. von Molnar, M. L. Roukes, et al. – DOI: 10.1126/science.1065389. – Текст : непосредственный // Science. – 2001. – Vol. 294, № 5546. – P. 1488-1495 : 5 рис. – Библиогр.: p. 1494-1495 (120 назв.). – Имеется электронная версия печатной публикации. – URL: <https://science.sciencemag.org/content/294/5546/1488> (дата обращения: 17.02.2021). – Режим доступа: по подписке СВУ. – ISSN 0036-8075.

### Самая цитируемая статья по спинтронике (более 9 000 ссылок в Web of Science)

- (1987).  
31. H. Pirovski, H. Poppa, E. Bauer, J. Hurst, *Ultramicroscopy* **47**, 339 (1992).  
32. T. Duden, E. Bauer, *Phys. Rev. B* **59**, 474 (1999).  
33. R. Wiesendanger, H.-J. Güntherodt, G. Güntherodt, R. J. Gambino, R. Ruf, *Phys. Rev. Lett.* **65**, 247 (1990).  
44. W. K. Hiebert, A. Stankiewicz, M. R. Freeman, *Phys. Rev. Lett.* **79**, 1134 (1997).  
45. D. D. Awschalom, J.-M. Halbout, S. von Molnar, T. Siegrist, F. Holtzberg, *Phys. Rev. Lett.* **55**, 1128 (1985).  
46. Y. Acremann et al., *Science* **290**, 492 (2000).  
57. We thank many colleagues for discussions and we thank G. Nunes and J. Beamish for comments on the manuscript. Supported by Natural Sciences and Engineering Research Council, Canadian Institute for Advanced Research, Informatics Circle of Research Excellence, and the Canada Research Chairs.

## REVIEW

## Spintronics: A Spin-Based Electronics Vision for the Future

S. A. Wolf,<sup>1,2\*</sup> D. D. Awschalom,<sup>3</sup> R. A. Buhrman,<sup>4</sup> J. M. Daughton,<sup>5</sup> S. von Molnar,<sup>6</sup> M. L. Roukes,<sup>7</sup> A. Y. Chtchelkanova,<sup>8</sup> D. M. Treger<sup>8</sup>

This review describes a new paradigm of electronics based on the spin degree of freedom of the electron. Either adding the spin degree of freedom to conventional charge-based electronic devices or using the spin alone has the potential advantages of nonvolatility, increased data processing speed, decreased electric power consumption, and increased integration densities compared with conventional semiconductor devices. To successfully incorporate spins into existing semiconductor technology, one has to resolve technical issues such as efficient injection, transport, control and manipulation, and detection of spin polarization as well as spin-polarized currents. Recent advances in new materials engineering hold the promise of realizing spintronic devices in the near future. We review the current state of the spin-based devices, efforts in new materials fabrication, issues in spin transport, and optical spin manipulation.

Until recently, the spin of the electron was ignored in mainstream charge-based electronics. A technology has emerged called spintronics (spin transport electronics or spin-based electronics), where it is not the electron charge but the electron spin that carries information, and this offers opportunities for a

new generation of devices combining standard microelectronics with spin-dependent effects that arise from the interaction between spin of the carrier and the magnetic properties of the material.

Traditional approaches to using spin are based on the alignment of a spin (either “up” or “down”) relative to a reference (an applied magnetic field or magnetization orientation of the ferromagnetic film). Device operations then proceed with some quantity (electrical current) that depends in a predictable way on the degree of alignment. Adding the spin degree of freedom to conventional semiconductor charge-based electronics or using the spin degree of freedom alone will add substantially more capability and performance to electronic products. The advantages of these new devices would be nonvolatility, increased data processing speed, decreased electric power consumption, and increased integration densities

compared with conventional semiconductor devices.

Major challenges in this field of spintronics that are addressed by experiment and theory include the optimization of electron spin lifetimes, the detection of spin coherence in nanoscale structures, transport of spin-polarized carriers across relevant length scales and heterointerfaces, and the manipulation of both electron and nuclear spins on sufficiently fast time scales. In response, recent experiments suggest that the storage time of quantum information encoded in electron spins may be extended through their strong interplay with nuclear spins in the solid state. Moreover, optical methods for spin injection, detection, and manipulation have been developed that exploit the ability to precisely engineer the coupling between electron spin and optical photons. It is envisioned that the merging of electronics, photonics, and magnetism will ultimately lead to new spin-based multifunctional devices such as spin-FET (field effect transistor), spin-LED (light-emitting diode), spin RTD (resonant tunneling device), optical switches operating at terahertz frequency, modulators, encoders, decoders, and quantum bits for quantum computation and communication. The success of these ventures depends on a deeper understanding of fundamental spin interactions in solid state materials as well as the roles of dimensionality, defects, and semiconductor band structure in modifying these dynamics. If we can understand and control the spin

<sup>1</sup>Defense Advanced Research Projects Agency (DARPA), 3701 North Fairfax Drive, Arlington, VA 22203, USA. <sup>2</sup>Naval Research Laboratory, Washington, DC 20375, USA. <sup>3</sup>University of California, Department of Physics, Santa Barbara, CA 93106, USA. <sup>4</sup>Cornell University, Applied and Engineering Physics, 211 Clark Hall, Ithaca, NY 14853, USA. <sup>5</sup>NVE, 11409 Valley View Road, Eden Prairie, MN 55344, USA. <sup>6</sup>Florida State University, MARTECH, 406 Keen Building, Tallahassee, FL 32306, USA. <sup>7</sup>California Institute of Technology, Department of Physics, MS-114-36, Pasadena, CA 91125, USA. <sup>8</sup>Strategic Analysis, 3601 Wilson Boulevard, Suite 500, Arlington, VA 22201, USA.

\*To whom correspondence should be addressed. E-mail: [swolf@darpa.mil](mailto:swolf@darpa.mil)

## Topical Review

## Future perspectives for spintronic devices

Atsufumi Hirohata<sup>1,2</sup> and Koki Takanashi<sup>3</sup><sup>1</sup> Department of Electronics, University of York, York YO10 5DD, UK<sup>2</sup> PRESTO, Japan Science and Technology Agency (JST), 4-1-8 Honcho Kawaguchi, Saitama 332-0012, Japan<sup>3</sup> Institute for Materials Research, Tohoku University, Sendai 980-8577, JapanE-mail: [atsufumi.hirohata@york.ac.uk](mailto:atsufumi.hirohata@york.ac.uk)

Received 3 October 2013, revised 9 January 2014

Accepted for publication 10 January 2014

Published 25 April 2014

**Abstract**

Spintronics is one of the emerging research fields in nanotechnology and has been growing very rapidly. Studies of spintronics were started after the discovery of giant magnetoresistance in 1988, which utilized spin-polarized electron transport across a non-magnetic metallic layer. Within 10 years, this discovery had been implemented into hard disk drives, the most common storage media, followed by recognition through the award of the Nobel Prize for Physics 19 years later. We have never experienced such fast development in any scientific field. Spintronics research is now moving into second-generation spin dynamics and beyond. In this review, we first examine the historical advances in spintronics together with the background physics, and then describe major device applications.

Keywords: spintronics, devices, GMR, TMR, spin injection

(Some figures may appear in colour only in the online journal)

**1. Introduction***1.1. Concepts of spintronics*

Spintronics is a new emerging field based on a combination of three conventional information carriers: an electron charge, an electron spin and a photon, as shown schematically in figure 1 [1–12]. These carriers represent three major fields in information technology (IT): data processing with electron transport, data storage with an assembly of spins and data transfer via optical connections.

Recent dramatic developments in IT require both larger capacity data storage and faster data processing. Surprisingly, the performance of both data storage and processing devices has been improving at the very high rate of approximately 30% per year in data storage, and by 100% in 18 months for Si-based processors—a trend known as Moore's law (see figure 2). Since the possibilities of reaching the limits have been announced in both ferromagnet-based memories and conventional semiconductor-based electronic processors, so-called magnetoelectronics, based on spin-polarized electron transport, was born, and has been providing a much

Furthermore, the electron spin can be connected to optics via photon helicity, which is expected to enable a much faster transfer of data.

The breakthrough in this field was the discovery of giant magnetoresistance (GMR) observed in metallic multilayers via spin-dependent electron transport [13–16]. The GMR effect has already been used practically in hard disk drive (HDD) heads. The discovery of the tunnelling magnetoresistance (TMR) effect was also a milestone. It was discovered earlier than the GMR effect but was not realized at room temperature (RT) until recently [17–22].

Simultaneously, from the semiconductor community, dilute magnetic semiconductors (DMS) have been the subjects of a large number of studies [23–27]. After the discovery of giant  $g$ -factors, many important novel characteristics were found, such as carrier-induced ferromagnetism [23] and photo-induced ferromagnetism [24].

Future IT will require Gbps data transfer rates via optical fibres. An essential part of such data transfer is the fast operation of the diode laser, which depends on the efficiency of the optical isolator. An optical isolator consisting of a DMS is the first practical use of spintronics based on large magneto-

Hirohata, A. Future perspectives for spintronic devices / A. Hirohata and K. Takanashi. – DOI: 10.1088/0022-3727/47/19/193001. – Текст : непосредственный // Journal of Physics D: Applied Physics. – 2014. – Vol. 47, № 19. – P. 193001-1-193001-40 : 41 рис. – Библиогр.: p. 193001-34-193001-40 (400 назв.). – Имеется электронная версия печатной публикации. – URL: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/0022-3727/47/19/193001> (дата обращения: 10.02.2021). – Режим доступа: по подписке СГУ. – ISSN 0022-3727.

## Magnonics

V V Kruglyak<sup>1</sup>, S O Demokritov<sup>2</sup> and D Grundler<sup>3</sup><sup>1</sup> School of Physics, University of Exeter, Stocker Road, Exeter EX4 4QL, UK<sup>2</sup> Institut für Angewandte Physik, Westfälische Wilhelms-Universität Münster, Corrensstrasse 2-4, 48149 Münster, Germany<sup>3</sup> Lehrstuhl für Physik Funktionaler Schichtsysteme, Physik-Department E10, Technische Universität München, James-Frank-Strasse, D-85747 Garching, Germany

Received 27 January 2010, in final form 13 April 2010

Published 17 June 2010

Online at [stacks.iop.org/JPhysD/43/264001](http://stacks.iop.org/JPhysD/43/264001)**Abstract**

Magnonics is a young field of research and technology emerging at the interfaces between the study of spin dynamics, on the one hand, and a number of other fields of nanoscale science and technology, on the other. We review the foundations and recent achievements in magnonics in view of guiding further progress from studying fundamental magnonic phenomena towards applications. We discuss the major challenges that have to be addressed in future research in order to make magnonics a pervasive technology.

(Some figures in this article are in colour only in the electronic version)

**1. Introduction**

The concept of spin waves (SWs) as dynamic eigenmodes of a magnetically ordered medium was introduced by Bloch 80 years ago [1]. From a classical point of view, a SW represents a phase-coherent precession of microscopic vectors of magnetization of the magnetic medium [2, 3]. Holstein and Primakoff [4] and Dyson [5] introduced quanta of SWs called magnons. They have predicted that magnons should behave as weakly interacting quasiparticles obeying the *Bose–Einstein statistics*. Therefore, the term *magnonics* should in principle describe a subfield of magnetism connected with quantum magnetic dynamic phenomena. However, in a similar way as *electronics* addresses a broad variety of effects that are not limited by a quantized structure of the electrical current (e.g. single electron devices, shot noise, etc), there is now a broad consensus to use the term *magnonics* to cover a broad field of magnetism connected with SWs in general.

Early experimental evidence for the existence of SWs came from measurements of thermodynamic properties of ferromagnets, in particular the temperature dependence of their saturation magnetization  $M_0$ . The famous  $T^{3/2}$  Bloch law is an indirect confirmation of the existence of SWs in nature [6]. The first direct observation of SWs was made using ferromagnetic resonance (FMR) by Griffiths for the case of uniform precession [7], which can be viewed as a SW with a wave vector  $k = 0$ . Later, Brillouin light scattering

aspects, a SW can be considered as a magnetic analogue of a sound or light wave. Several decades of experimental and theoretical research have demonstrated that SWs exhibit most of the properties inherent in waves of other origins. In particular, the excitation and propagation [9–17], reflection and refraction [18–27], interference and diffraction [28–33], focusing and self-focusing [34–43], tunnelling [44, 45] of SWs and Doppler effect [46–48] as well as formation of SW envelope solitons [49–52] were observed. SW quantization due to the finite size effect was discovered very early in thin films [53, 54]. Recently it was observed and extensively studied in laterally confined magnetic structures [55–61]. The macroscopic quantum phenomenon of Bose–Einstein condensation (BEC) of magnons was demonstrated in a few different magnetic systems [62–64]. In yttrium–iron garnets (YIG) BEC of magnons was observed at room temperature. As discussed later, this effect might be used to generate microwave signals by conversion of the energy of incoherent broadband electromagnetic radiation into monochromatic SWs or electromagnetic radiation. In spintronics, SWs are considered as a mechanism responsible for phase locking of arrays of spin transfer torque oscillators [65–70] and for rectification of microwave currents passed through ferromagnetic microwave guides [71–73].

Such a broad variety of observations has stimulated the field of magnonics [74–77]. Similar to spintronics [78, 79], the main application direction of magnonics is connected

Kruglyak, V. V. Magnonics / V. V. Kruglyak, S. O. Demokritov and D. Grundler. – DOI: 10.1088/0022-3727/43/26/264001. – Текст : непосредственный // Journal of Physics D: Applied Physics. – 2010. – Vol. 43, № 26. – P. 264001-1-264001-14 : 7 рис. – Библиогр.: p. 264001-10-264001-14 (297 назв.). – Имеется электронная версия печатной публикации. – URL: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/0022-3727/43/26/264001> (дата обращения: 10.02.2021). – Режим доступа: по подписке СГУ. – ISSN 0022-3727.

VOLUME 525  
1 May 2021

Editor-in-Chief:  
MARCELO KNOBEL

Editors:  
DORA ALTBIR  
RAMESH C. BUDHANI  
OKSANA FESENKO  
XIUFENG HAN  
ATSUFUMI HIROHATA  
J. SAMUEL JIANG  
TAE HEE KIM  
LARISSA PANINA  
RENAT SABIRIANOV  
HAO ZENG



Recognized by the  
European Physical Society

NORTH-HOLLAND  
www.elsevier.com/locate/jmmm



## Review on spintronics: Principles and device applications

Atsufumi Hirohata<sup>a,\*</sup>, Keisuke Yamada<sup>b</sup>, Yoshinobu Nakatani<sup>c</sup>, Ioan-Lucian Prejbeanu<sup>d</sup>,  
Bernard Diény<sup>d</sup>, Philipp Pirro<sup>e</sup>, Burkard Hillebrands<sup>e</sup>

<sup>a</sup> Department of Electronic Engineering, University of York, York YO10 5DD, United Kingdom

<sup>b</sup> Department of Chemistry and Biomolecular Science, Gifu University, Gifu 501-1112, Japan

<sup>c</sup> Graduate School of Informatics and Engineering, University of Electro-Communications, Chofu 182-8585, Japan

<sup>d</sup> SPINTEC, Univ. Grenoble Alpes, CEA, CNRS, F-38000 Grenoble, France

<sup>e</sup> Fachbereich Physik und Landesforschungszentrum OPTIMAS, Technische Universität Kaiserslautern, 67663 Kaiserslautern, Germany

### ARTICLE INFO

**Keywords:**  
Spintronics  
Spin-current generation  
Spin-transfer torque  
Spin-orbit effects  
Electric field  
Electromagnetic wave  
Spin Hall effects  
Spin Seebeck effect  
Spin Nernst effect  
Magnetic sensor  
Hard disk drive  
Magnetic random access memory  
Racetrack memory  
Neuromorphic  
Magnetic skyrmion  
Landau-Lifshitz-Gilbert equation  
Magnetic damping  
Dzyaloshinskii-Moriya interaction

### ABSTRACT

Spintronics is one of the emerging fields for the next-generation nanoelectronic devices to reduce their power consumption and to increase their memory and processing capabilities. Such devices utilise the spin degree of freedom of electrons and/or holes, which can also interact with their orbital moments. In these devices, the spin polarisation is controlled either by magnetic layers used as spin-polarisers or analysers or via spin-orbit coupling. Spin waves can also be used to carry spin current. In this review, the fundamental physics of these phenomena is described first with respect to the spin generation methods as detailed in Sections 2–9. The recent development in their device applications then follows in Sections 10 and 11. Future perspectives are provided at the end.

Hirohata, A. Review on spintronics: Principles and device applications / A. Hirohata, K. Yamada, Y. Nakatani, I. L. Prejbeanu, B. Dieny, P. Pirro, et al. – DOI: 10.1016/j.jmmm.2020.166711. – Текст : непосредственный // Journal of Magnetism and Magnetic Materials. – 2020. – Vol. 509. – P. 166711-1-166711-28 : 18 рис. – Библиогр.: p. 166711-23-166711-28. (391 назв.). – Имеется электронная версия печатной публикации. – URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0304885320302353> (дата обращения: 10.02.2021). – Режим доступа: по подписке СГУ. – ISSN 0304-8853.

**Abbreviations:** 1D, one-dimensional; 2D, two-dimensional; 2DEG, two-dimensional electron gas; 3D, three-dimensional; AB, Aharonov-Bohm; AEE, anomalous Ettingshausen effect; AF, antiferromagnetic, antiferromagnet; Alq<sub>3</sub>, tris(8-hydroxyquinolato) aluminium; AMR, anisotropic magnetoresistance; ANE, anomalous Nernst effect; ARPES, angle-resolved photoemission spectroscopy; ASS, Altshuler-Aronov-Spivak; BLS, Brillouin light scattering; CIMS, current-induced magnetisation switching; CIP, current in the plane; CPP, current perpendicular to the plane; CuPc, copper phthalocyanine; DMI, Dzyaloshinskii-Moriya interaction; DMS, dilute magnetic semiconductor; DOS, density of states; DRAM, dynamic random access memory; DW, domain wall; EDL, electric double layer; EL, electroluminescence; F, fabrication rule; FET, field effect transistor; FM, ferromagnetic, ferromagnet; FMR, ferromagnetic resonance; GMR, giant magnetoresistance; HAMR, heat-assisted magnetic recording; HDD, hard disk drive; HM, heavy metal; HMF, half-metallic ferromagnet; LED, light emitting diode; LLG, Landau-Lifshitz-Gilbert; LSMO, La<sub>0.7</sub>Sr<sub>0.3</sub>MnO<sub>3</sub>; MAMR, microwave-assisted magnetic recording; MCD, magnetic circular dichroism; MO, magneto-optical; MOS, metal-oxide-semiconductor; MRAM, magnetic random access memory; MTJ, magnetic tunnel junction; MWCNT, multi-walled carbon nanotube; NM, non-magnetic, non-magnet; NOL, nano-oxide layer; p-MTJ, perpendicularly-magnetised magnetic tunnel junction; PSA, perpendicular shape anisotropy; Py, permalloy; QW, quantum well; RA, resistance-area product; ReRAM, resistive random access memory; RM, racetrack memory; RT, room temperature; SAW, surface acoustic wave; SC, semiconductor, semiconductor; SET, single electron transistor; SOT, spin-orbit-torque; SP-STM, spin-polarised scanning tunnelling microscopy; SQUID, superconducting quantum interference device; SRAM, static random access memory; STO, spin-torque oscillator; STT, spin-transfer torque; TAMR, tunnelling anisotropic magnetoresistance; TI, topological insulator; TMR, tunnelling magnetoresistance; TR-MOKE, time-resolved magneto-optical Kerr effect; VCMA, voltage induced change of magnetic anisotropy; VCSEL, vertical cavity surface emitting laser; YIG, yttrium iron garnets

\* Corresponding author.

E-mail address: [atsufumi.hirohata@york.ac.uk](mailto:atsufumi.hirohata@york.ac.uk) (A. Hirohata).

<https://doi.org/10.1016/j.jmmm.2020.166711>

Received 28 January 2020; Received in revised form 4 March 2020; Accepted 7 March 2020

Available online 09 March 2020

0304-8853/ © 2020 The Authors. Published by Elsevier B.V. This is an open access article under the CC BY license (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).



ELSEVIER



Check for updates

RESEARCH REVIEW

# Spintronics based random access memory: a review

Sabpreet Bhatti<sup>1</sup>, Rachid Sbiaa<sup>2</sup>, Atsufumi Hirohata<sup>3</sup>, Hideo Ohno<sup>4,5,6,7,8</sup>, Shunsuke Fukami<sup>4,5,6,7</sup>, S.N. Piramanayagam<sup>1,\*</sup>

<sup>1</sup> Division of Physics and Applied Physics, School of Physical and Mathematical Sciences, Nanyang Technological University, 637371, Singapore

<sup>2</sup> Department of Physics, Sultan Qaboos University, P. O. Box 36, PC 123, Muscat, Oman

<sup>3</sup> Department of Electronics, University of York, Heslington, York YO10 5DD, United Kingdom

<sup>4</sup> Laboratory for Nanoelectronics and Spintronics, Research Institute of Electrical Communication, Tohoku University, 2-1-1 Katahira, Aoba-ku, Sendai 980-8577, Japan

<sup>5</sup> Center for Spintronics Integrated Systems, Tohoku University, 2-1-1 Katahira, Aoba-ku, Sendai 980-8577, Japan

<sup>6</sup> Center for Innovative Integrated Electronic Systems, Tohoku University, 468-1 Aramaki Aza Aoba, Aoba-ku, Sendai 980-0845, Japan

<sup>7</sup> Center for Spintronics Research Network, Tohoku University, 2-1-1 Katahira, Aoba-ku, Sendai 980-8577, Japan

<sup>8</sup> WPI-Advanced Institute for Materials Research, Tohoku University, 2-1-1 Katahira, Aoba-ku, Sendai 980-8577, Japan

This article reviews spintronics based memories, in particular, magnetic random access memory (MRAM) in a systematic manner. Debuted as a humble 4 Mb product by FreeScale in 2006, the MRAM has grown to a 256 Mb product of Everspin in 2016. During this period, MRAM has overcome several hurdles and have reached a stage, where the potential for MRAM is very promising. One of the main hurdles that the MRAM overcome between 2006 and 2016 is the way the information is written. The 4 Mb MRAM used a magnetic field based switching technology that would be almost impossible to scale below 100 nm. The 256 Mb MRAM, on the other hand uses a different writing mechanism based on Spin Transfer Torque (STT), which is scalable to very low dimensions. In addition to the difference in the writing mechanism, there has also been a major shift in the storage material. Whereas the 4 Mb MRAM used materials with in-plane magnetic anisotropy, the 256 Mb MRAM uses materials with a perpendicular magnetic anisotropy (PMA). MRAM based on PMA is also scalable to much higher densities.

The paper starts with a brief history of memory technologies, followed by a brief description of the working principles of MRAM for novice. Reading information from MRAM, the technologies, materials and technologies involved in writing information are described. The magnetic field based writing and its limitations are described first, followed by an explanation of STT mechanism. The materials and physics behind storage of information is described next. MRAMs with in-plane magnetization, their layered material structure and the disadvantages are described first, followed by the advantages of MRAMs with perpendicular magnetization, their advantages etc. The technologies to improve writability and potential challenges and reliability issues are discussed next. Some of the future technologies that might

Bhatti, S. Spintronics based random access memory: a review / S. Bhatti, R. Sbiaa, A. Hirohata, H. Ohno, S. Fukami and S. N. Piramanayagam. – DOI: 10.1016/j.mattod.2017.07.007. – Текст : непосредственный // Materials Today. – 2017. – Vol. 20, № 9. – P. 530-548 : 14 рис. – Библиогр.: p. 546-548 (233 назв.). – Имеется электронная версия печатной публикации. – URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1369702117304285> (дата обращения: 10.02.2021). – Режим доступа: по подписке СГУ. – ISSN 2352-9407.

## Magnon spintronics

A. V. Chumak\*, V. I. Vasyuchka, A. A. Serga and B. Hillebrands

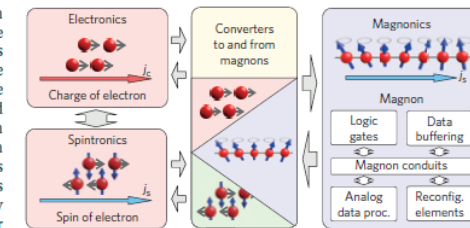
Magnon spintronics is the field of spintronics concerned with structures, devices and circuits that use spin currents carried by magnons. Magnons are the quanta of spin waves: the dynamic eigen-excitations of a magnetically ordered body. Analogous to electric currents, magnon-based currents can be used to carry, transport and process information. The use of magnons allows the implementation of novel wave-based computing technologies free from the drawbacks inherent to modern electronics, such as dissipation of energy due to Ohmic losses. Logic circuits based on wave interference and nonlinear wave interaction can be designed with much smaller footprints compared with conventional electron-based logic circuits. In this review, after an introduction into the basic properties of magnons and their handling, we discuss the inter-conversion between magnon currents and electron-carried spin and charge currents; and concepts and experimental studies of magnon-based computing circuits.

A disturbance in local magnetic ordering can propagate in a magnetic material in the form of a wave. Such a wave was first predicted by F. Bloch in 1929 (ref. 1) and was named a spin wave as it is related to the collective excitations of the electron spin system in ferromagnetic metals and insulators<sup>2,3</sup>. The wide variety of linear and nonlinear spin-wave phenomena boosted interest into the fundamental properties<sup>2-4</sup>, while spin waves in the GHz frequency range were of great interest for applications in telecommunication systems and radars<sup>5,6</sup>. Nowadays, spin waves are considered as potential data carriers for computing devices, as they have nanometre wavelengths, can be in the low-THz frequency range, provide Joule-heat-free transfer of spin information over macroscopic distances, and access to wave-based computing concepts (see Box 1)<sup>7-44</sup>.

The field of science that refers to information transport and processing by spin waves is known as magnonics<sup>22,45,46</sup>. This name relates to the magnon—the spin-wave quantum associated with the flip of a single spin. The usage of magnonic approaches in the field of spintronics, hitherto dealing with electron-carried spin currents, gave birth to the emerging field of magnon spintronics<sup>47</sup>. The scheme of magnon spintronics in Fig. 1 shows that, besides magnon-based elements operating with analog and digital data, this field comprises also converters between the magnon subsystem and the electron-carried spin and charge currents. These converters interface the magnonic circuitry with spintronic and electronic environments. The main building blocks of magnon spintronics shown in Fig. 1 are discussed here in the light of their advantages, challenges and perspectives.

### Spin-wave basics and toolbox

Two general types of interactions couple electron spins and thus define the spin-wave characteristics: strong but short-distance exchange interaction and relatively weak long-range dipole-dipole interactions. The waves with short wavelength  $\lambda$  (roughly,  $\lambda < 1 \mu\text{m}$ ), whose properties are mostly governed by the exchange interaction, are named exchange spin waves. Correspondingly, the long-wavelength waves are named dipolar or magnetostatic waves



**Figure 1 | The concept of magnon spintronics.** Information coded into charge or spin currents is converted into magnon currents, processed within the magnonic system and converted back<sup>47</sup>.

angle between the spin-wave wavevector  $k$  and the saturation magnetization  $M$ . In an in-plane magnetized magnetic film, waves propagating along and transverse to  $M$  are named backward volume magnetostatic waves (BVMSWs) and magnetostatic surface waves (MSSWs, also known as Damon–Eshbach waves), respectively. Dipolar waves in a normally magnetized film are named forward volume magnetostatic waves (FVMSWs). Historically, most of the magnon-based devices for microwave signals processing<sup>5,6</sup> operate with dipolar spin waves, which can be excited and detected rather conveniently by inductive antennas. Nowadays, attention is more focused on the exchange waves that allow usage in nanometre-sized structures and devices. All these types of waves have different dispersion characteristics (dependencies of the spin-wave frequency  $f$  on the wavenumber  $k$ )<sup>48</sup> and nonlinear properties, and thus offer specific advantages for data processing<sup>22,45,46</sup>.

Spin waves are usually excited in thin films and conduits fabricated in the form of narrow strips of a magnetic material. The most commonly used materials are polycrystalline metallic films of Permalloy (Py, Ni<sub>81</sub>Fe<sub>19</sub>) (refs 45,46), which combine a relatively low magnetic damping with good suitability for micro-

Chumak, A. V. Magnon spintronics / A. V. Chumak, V. I. Vasyuchka, A. A. Serga and B. Hillebrands. – DOI: 10.1038/nphys3347. – Текст : непосредственный // Nature Physics. – 2015. – Vol. 11, № 6. – P. 453-461 : 5 рис. – Библиогр.: p. 459-461 (138 назв.). – Имеется электронная версия печатной публикации. – URL: <https://www.nature.com/articles/nphys3347> (дата обращения: 10.02.2021). – Режим доступа: по подписке СГУ. – ISSN 1745-2473.

ФЕДЕРАЛЬНАЯ СЛУЖБА  
ПО ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ СОБСТВЕННОСТИ

## (12) ОПИСАНИЕ ИЗОБРЕТЕНИЯ К ПАТЕНТУ

(52) СПК  
H01P 5/18 (2019.02)

(21)(22) Заявка: 2019102095, 25.01.2019

(24) Дата начала отсчета срока действия патента:  
25.01.2019Дата регистрации:  
19.08.2019Приоритет(ы):  
(22) Дата подачи заявки: 25.01.2019

(45) Опубликовано: 19.08.2019 Бюл. № 23

Адрес для переписки:  
125009, Москва, ул. Моховая, 11, корп. 7, ИРЭ  
им. В.А. Котельникова РАН, Патентный отдел(72) Автор(ы):  
Бегинин Евгений Николаевич (RU),  
Садовников Александр Владимирович (RU),  
Попов Павел Александрович (RU),  
Шараевская Анна Юрьевна (RU),  
Калябин Дмитрий Владимирович (RU),  
Стогний Александр Иванович (BY),  
Никитов Сергей Аполлонович (RU)(73) Патентообладатель(и):  
Федеральное государственное бюджетное  
учреждение науки Институт радиотехники  
и электроники им. В.А. Котельникова  
Российской академии наук (RU)(56) Список документов, цитированных в отчете  
о поиске: RU 2454788 C1, 27.06.2012. RU  
2617143 C1, 21.04.2017. RU 2666969 C1,  
13.09.2018. US 8487391 B2, 16.07.2013. US  
2017104150 A1, 13.04.2017.

## (54) ФУНКЦИОНАЛЬНЫЙ ЭЛЕМЕНТ МАГНОНИКИ

(57) Реферат:

Изобретение относится к СВЧ технике и может быть использовано при конструировании приборов на магнитостатических волнах в гигагерцовом диапазоне частот. Функциональный элемент магноники содержит немагнитную подложку, размещенную на ней ферромагнитную пленку из железиттриевого граната (ЖИГ), микрополосковые преобразователи для возбуждения и приема магнитостатических спиновых волн (МСВ) в пленке ЖИГ, источник магнитного поля. На поверхности подложки, прилегающей к пленке ЖИГ, образована структура в форме меандра из канавок,

продольная ось которых перпендикулярна направлению распространения МСВ. Пленка ЖИГ повторяет контур образованных канавками выступов, боковых граней и пазов, а магнитное поле источника магнитного поля ориентировано перпендикулярно к плоскости подложки с возможностью возбуждения в пленке ЖИГ объемных МСВ. Технический результат – расширение функциональных возможностей элемента, обеспечение возможности соединения между собой магнных элементов в многослойные трехмерные структуры. 6 з.п. ф-лы, 2 ил.

Patent № RU 2697724 C1 Russia. Функциональный элемент магноники : № 2019102095 : заявл. 25.01.2019 : опубл. : 19.08.2019 / Бегинин Е. Н., Садовников А. В., Попов П. А., Шараевская А. Ю., Калябин Д. В., Стогний А. И., Никитов С. А. – 9 с. – Текст : непосредственный. – Имеется электронная версия печатной публикации. – URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=39275214> (дата обращения: 14.02.2021). – Режим доступа: свободный.

ФЕДЕРАЛЬНАЯ СЛУЖБА  
ПО ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ СОБСТВЕННОСТИ

## (12) ОПИСАНИЕ ПОЛЕЗНОЙ МОДЕЛИ К ПАТЕНТУ

(52) СПК  
H03B 15/00 (2019.02)

(21)(22) Заявка: 2018143773, 10.12.2018

(24) Дата начала отсчета срока действия патента:  
10.12.2018Дата регистрации:  
30.05.2019Приоритет(ы):  
(22) Дата подачи заявки: 10.12.2018

(45) Опубликовано: 30.05.2019 Бюл. № 16

Адрес для переписки:  
620108, г. Екатеринбург, ул. С. Ковалевской,  
18, Федеральное государственное бюджетное  
учреждение науки Институт физики металлов  
имени М.Н. Михеева Уральского отделения  
Российской академии наук (ИФМ УрО РАН),  
патентный отдел(72) Автор(ы):  
Демокритов Сергей Олегович (DE),  
Ринкевич Анатолий Брониславович (RU),  
Немытова Ольга Владимировна (RU)(73) Патентообладатель(и):  
Федеральное государственное бюджетное  
учреждение науки Институт физики  
металлов имени М.Н. Михеева Уральского  
отделения Российской академии наук (ИФМ  
УрО РАН) (RU)(56) Список документов, цитированных в отчете  
о поиске: Demidov V.E., и др. Excitation of  
coherent propagating spin waves by pure spin  
currents. Nat. Commun. 7, 10446 (2016). US  
9577653 B2, 21.02.2017. WO 2015195122 A1,  
23.12.2015. US 9425738 B2, 23.08.2016. US  
9739851 B2, 22.08.2017.

## (54) Наноосциллятор возбуждаемый спиновым током

(57) Реферат:



Полезная модель относится к генераторам микроволновых сигналов, работающим в устройствах нано- и микроэлектроники. Магнитные наноосцилляторы (МНО) представляют собой класс миниатюрных и широкополосных генераторов СВЧ сигналов, основанных на магнитных резонансах в одиночных или связанных магнитных тонких пленках.

Наноосциллятор, возбуждаемый спиновым током, включает вертикальный спиновый клапан, в виде трехслойной структуры, установленной на сапфировой подложке толщиной 0,3-0,5, состоящей из расположенных последовательно одна над другой пленки пермаллоя толщиной 5 нм, пленки меди, толщиной 20 нм и пленки железо-кобальт толщиной 8 нм. Структура оснащена круглым наноконтактом из золота

железо-кобальт через сапфировую подложку, и волноводной полоской пермаллоя толщиной 20 нм, расположенной поверх пленки пермаллоя, состоящей из основной части шириной 500 нм, конец которой совмещен с концом пленки пермаллоя, и суживающейся до 300 нм части, конец которой расположен на расстоянии 150 нм от центра круглого наноконтакта, при этом соотношение длин основной и суживающейся частей составляет 8:1. К наноконтакту и к поверхности волноводной полоски пермаллоя присоединены, соответственно, два электрода из золота толщиной 20 нм. На поверхность пленки из пермаллоя трехслойной структуры и электрода, соединенного с поверхностью волноводной полоски пермаллоя, нанесена прозрачная пленка из нитрида кремния, толщина и состав которой выбраны таким образом, чтобы обеспечить

Patent № RU 189670 U1 Russia. Наноосциллятор возбуждаемый спиновым током : № : 2018143773 : заявл. 10.12.2018 : опубл. 30.05.2019 / Демокритов С. О., Ринкевич А. Б., Немилова О. В. – 9 с. – Текст : непосредственный. – Имеется электронная версия печатной публикации. – URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=39390586> (дата обращения: 14.02.2021). – Режим доступа: свободный.





<http://elibrary.ru>

 НАУЧНАЯ ЭЛЕКТРОННАЯ  
БИБЛИОТЕКА  
LIBRARY.RU
Поиск в библиотеке Навигатор 

- ЖУРНАЛЫ ▶
- КНИГИ ▶
- ПАТЕНТЫ ▶
- ПОИСК ▶
- АВТОРЫ ▶
- ОРГАНИЗАЦИИ ▶
- КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА ▶
- РУБРИКАТОР ▶
- ССЫЛКИ ▶
- ПОДБОРКИ ▶

Начальная страница

Текущая сессия Легенда 

-  Доступ к полному тексту документа открыт
-  Полный текст доступен на сайте издателя
-  Полный текст может быть получен через систему заказа
-  Доступ к полному тексту закрыт
- Если иконки нет - полный текст документа отсутствует в НЭБ

РЕЗУЛЬТАТЫ ПОИСКОВОГО ЗАПРОСА

ВСЕГО НАЙДЕНО ПУБЛИКАЦИЙ: 3729 из 35710618

№	Публикация	Цит.
1	<b>05.15-1952.270 СПИНТРОНИКА И СПИНТРОННЫЕ МАТЕРИАЛЫ</b> РЖ 19Б-2. Физическая химия (Кристаллохимия. Химия твердого тела. Газы. Жидкости. Аморфные тела. Поверхностные явления. Химия коллоидов). 2005. № 15.	0
2	<b>05.17-1952.302 МАГНИТНЫЕ ПОЛУПРОВОДНИКИ КАК МАТЕРИАЛЫ СПИНТРОНИКИ И ПРИРОДА ИХ ФЕРРОМАГНЕТИЗМА</b> РЖ 19Б-2. Физическая химия (Кристаллохимия. Химия твердого тела. Газы. Жидкости. Аморфные тела. Поверхностные явления. Химия коллоидов). 2005. № 17.	0
3	<b>ФЕРРОМАГНИТНЫЙ КОМПОЗИТ ДЛЯ СПИНТРОНИКИ</b> <i>Борухович А.С., Игнатьева Н.И., Бамбуров В.Г.</i> Доклады Академии наук. 2005. Т. 402. № 2. С. 181-183.	10
4	<b>ЭФФЕКТ БЛИЗОСТИ СВЕРХПРОВОДНИК/ФЕРРОМАГНЕТИК И ЕГО ВОЗМОЖНОЕ ИСПОЛЬЗОВАНИЕ В СПИНТРОНИКЕ</b> <i>Гарифуллин И.А.</i> Успехи физических наук. 2006. Т. 176. № 6. С. 676-679.	0
5	<b>ФЕРРОМАГНИТНЫЙ МАТЕРИАЛ CDGER<sub>2</sub>MN ДЛЯ СПИНТРОНИКИ</b> <i>Новоторцев В.М., Варнавский С.А., Маренкин С.Ф., Королева Л.И., Демин Р.В., Трухан В.М., Климонский С.О., Кузнецов В.Д.</i> Журнал неорганической химии. 2006. Т. 51. № 8. С. 1237-1240.	5
6	<b>СПИНТРОНИКА: ФИЗИЧЕСКИЕ ПРИНЦИПЫ, УСТРОЙСТВА, ПЕРСПЕКТИВЫ</b> <i>Огнев А.В., Самардак А.С.</i> Вестник Дальневосточного отделения Российской академии наук. 2006. № 4 (128). С. 70-80.	24
7	<b>МУЛЬТИФЕРРОИКИ: ПЕРСПЕКТИВНЫЕ МАТЕРИАЛЫ МИКРОЭЛЕКТРОНИКИ, СПИНТРОНИКИ И СЕНСОРНОЙ ТЕХНИКИ</b> <i>Звездин А.К., Логгинов А.С., Мешков Г.А., Пятаков А.П.</i> Известия Российской академии наук. Серия физическая. 2007. Т. 71. № 11. С. 1604-1605.	17
8	<b>РАЗБАВЛЕННЫЕ МАГНИТНЫЕ ПОЛУПРОВОДНИКИ И СПИНТРОНИКА</b> <i>Иванов В.А.</i> Известия Российской академии наук. Серия физическая. 2007. Т. 71. № 11. С. 1651-1653.	1
9	<b>АЛМАЗЫ ДЛЯ СПИНТРОНИКИ</b> <i>Ошалом Д., Хэнсон Р., Эпштейн Р.</i> В мире науки. 2008. № 1. С. 54-61.	0



Поиск

Инструменты ▾

Поисковые запросы и оповещения ▾

История поиска

Список отмеченных публикаций

Результаты: 14 283

(из Web of Science Core Collection)

Вы искали: ТЕМА: (Spintronics) OR  
ТЕМА: (magnonics) ...Больше

Создать оповещение

Уточнение результатов

Искать в результатах...



Фильтровать результаты по:

 Открытый доступ (3,226)

Уточнить

Годы публикаций ▲

- 2021 (117)
- 2020 (1,540)
- 2019 (1,414)
- 2018 (1,391)
- 2017 (1,239)

дополнительные параметры /  
значения...

Уточнить

Сортировать  
по:

публ.

Количество цитирований ↓

Показатель использования

Соответствие

Больше ▾

◀ 1 из 1429 ▶

 Выбрать всю страницу

Экспортировать в EndNote Online

Больше ▾

Добавьте в список отмеченных публикаций

Анализ результатов

Функция "Отчет по  
цитированию" недоступна.  
[?] 1. **Spintronics: A spin-based electronics vision for the future**

Автор:: Wolf, SA; Awschalom, DD; Buhrman, RA; с соавторами.

SCIENCE Том: 294 Выпуск: 5546 Стр.: 1488-1495 Опубликовано: NOV 16 2001

Полный текст от издателя

Просмотреть аннотацию ▾

Количество цитирований:  
8,851(из Web of Science Core  
Collection)

Показатель использования ▾

 2. **A comprehensive review of ZnO materials and devices**

Автор:: Ozgur, U; Alivov, YI; Liu, C; с соавторами.

JOURNAL OF APPLIED PHYSICS Том: 98 Выпуск: 4 Номер статьи: 041301 Опубликовано: AUG 15 2005

Полный текст от издателя

Бесплатно опубликованная статья из репозитория

Просмотреть аннотацию ▾

Количество цитирований:  
8,628(из Web of Science Core  
Collection)

Показатель использования ▾

 3. **Spintronics: Fundamentals and applications**

Автор:: Zutic, I; Fabian, J; Das Sarma, S

REVIEWS OF MODERN PHYSICS Том: 76 Выпуск: 2 Стр.: 323-410 Опубликовано: APR 2004

Полный текст от издателя

Бесплатно опубликованная статья из репозитория

Просмотреть аннотацию ▾

Количество цитирований:  
7,764(из Web of Science Core  
Collection)

Показатель использования ▾

11,870 результатов поиска документов

( TITLE-ABS-KEY ( spintronics ) OR TITLE-ABS-KEY ( magnonics ) )

[Редактировать](#) [Сохранить](#) [Настроить оповещение](#)

<http://www.scopus.com>

Scopus®

Искать в результатах...

Уточнить результаты

[Ограничить](#) [Исключить](#)

Open Access (открытый доступ)

- All Open Access (4 333) >
- Gold (1 061) >
- Hybrid Gold (289) >
- Bronze (656) >
- Green (3 577) >

Подробнее

Год

- 2021 (238) >
- 2020 (1 379) >
- 2019 (1 226) >
- 2018 (1 168) >
- 2017 (1 006) >
- 2016 (946) >
- 2015 (872) >
- 2014 (741) >
- 2013 (636) >
- 2012 (583) >

Смотреть меньше

Смотреть все

Автор

- Ohno, H. (80) >
- Felser, C. (58) >

Документы Вспомогательные документы Патенты

[Просмотреть данные Mendeley \(24351\)](#)

Анализировать результаты поиска

Показать все краткие описания Сортировать по: [Дата \(самые новые\)](#)

Все Экспорт RIS Скачать Просмотреть обзор цитирования Просмотр цитирующих документов Сохранить в список



	Название документа	Авторы	Год	Источник	Цитирования
<input type="checkbox"/> 1	Imaging non-collinear antiferromagnetic textures via single spin relaxometry <i>Открытый доступ</i>	Finco, A., Haykal, A., Tanos, R., (...), Cros, V., Jacques, V.	2021	Nature Communications 12(1),767	0
	Просмотр краткого описания <a href="#">View at Publisher</a> Связанные документы				
<input type="checkbox"/> 2	Integrated neuromorphic computing networks by artificial spin synapses and spin neurons <i>Открытый доступ</i>	Yang, S., Shin, J., Kim, T., (...), Jeong, Y.J., Hong, J.P.	2021	NPG Asia Materials 13(1),11	0
	Просмотр краткого описания <a href="#">View at Publisher</a> Связанные документы				
<input type="checkbox"/> 3	Electric-field control of skyrmions in multiferroic heterostructure via magnetoelectric coupling <i>Открытый доступ</i>	Ba, Y., Zhuang, S., Zhang, Y., (...), Hu, J.-M., Zhao, Y.	2021	Nature Communications 12(1),322	0
	Просмотр краткого описания <a href="#">View at Publisher</a> Связанные документы				
<input type="checkbox"/> 4	Half metallicity in Cr substituted Fe <sub>2</sub> TiSn <i>Открытый доступ</i>	Chaudhuri, S., Salas, D., Srihari, V., (...), Karaman, I., Bhohe, P.A.	2021	Scientific Reports 11(1),524	0
	Просмотр краткого описания <a href="#">View at Publisher</a> Связанные документы				
<input type="checkbox"/> 5	Imaging and identification of point defects in PtTe <sub>2</sub> <i>Открытый доступ</i>	Zhussupbekov, K., Ansari, L., McManus, J.B., (...), Ó Coileáin, C., McEvoy, N.	2021	npj 2D Materials and Applications 5(1),14	0
	Просмотр краткого описания <a href="#">View at Publisher</a> Связанные документы				
<input type="checkbox"/> 6	Thresholding of the Elliott-Yafet spin-flip scattering in multi...	Bern, A., Decker, D., Brückner...	2021	Scientific Reports	0

РЕСУРСЫ ИНТЕРНЕТ

РЕСУРСЫ ИНТЕРНЕТ



**Спинтронике  
надлежит занять  
важнейшее место  
в науке и технологии  
XXI века**

© Стольниц, М. М., Шишкина, В. Н., виртуальная выставка, 2021