

УДК 538.955-405

В.В. Шамаев (канд. техн. наук, доц.)¹,

А.В. Василенко (вед. инж.)²,

Т.А. Хачатурова (канд. физ.-мат. наук, м.н.с.)²,

¹Донецкий национальный технический университет

²Донецкий физико-технический институт им. А.А.Галкина НАН Украины,
alx_vasilen@mail.ru

МОДЕЛИРОВАНИЕ РАБОТЫ СПИНОВОГО ФИЛЬТРА, ОСНОВАННОГО НА КВАНТОВОМ РАЗМЕРНОМ ЭФФЕКТЕ

В данной работе предложен и теоретически обоснован новый метод увеличения спиновой поляризации туннелирующих электронов в многослойных структурах с помощью квантового размерного эффекта в ферромагнитной металлической пленке наноразмерной толщины. Математическое моделирование зарядового транспорта в проводящих гетероструктурах показало, что разброс толщин такой пленки, неизбежный в условиях промышленного производства, не окажет существенного влияния на обсуждаемый эффект, что позволит создать новые спинтронные устройства для вычислительной техники с гораздо большей эффективностью, чем существующие.

Ключевые слова: Математическое моделирование зарядового транспорта, квантовая электроника, спин-поляризованный ток, ферромагнитные пленки, размерный эффект

Введение

Спинтроника представляет собой новый раздел квантовой электроники, в котором базовым элементом является спин электрона, а не его заряд как в традиционных электронных устройствах [1]. В современных вычислительных устройствах уже используются спинтронные гетероструктуры в качестве магниторезистивной оперативной памяти. В отличие от общепринятых типов запоминающих устройств информация в ней хранится не в виде электрических зарядов или токов, а в магнитных элементах памяти, которые представляют собой два ферромагнитных электрода 2 и 4, разделенных сверхтонким слоем диэлектрика 3 (рис. 1,а) [2].

Основное, что препятствует широкому внедрению магниторезистивной памяти, – это недостаточно высокая степень спиновой поляризации электронов проводимости в ферромагнитных металлических

слоях. Проблема в том, что у $3d$ -ферромагнетиков (железо, кобальт, никель и их сплавы), использующихся в настоящее время в магниторезистивных элементах памяти, его величина даже при низких температурах достигает не более 20–30 процентов [3]. Значительно увеличить степень спиновой поляризации туннелирующих в детектор 4 электронов можно с помощью эффекта спиновой фильтрации, если в магниторезистивном элементе памяти заменить обычный диэлектрик 3 на ферромагнитный изолятор, а магнитные электроды 2 и 4 – на обычные металлы [4].

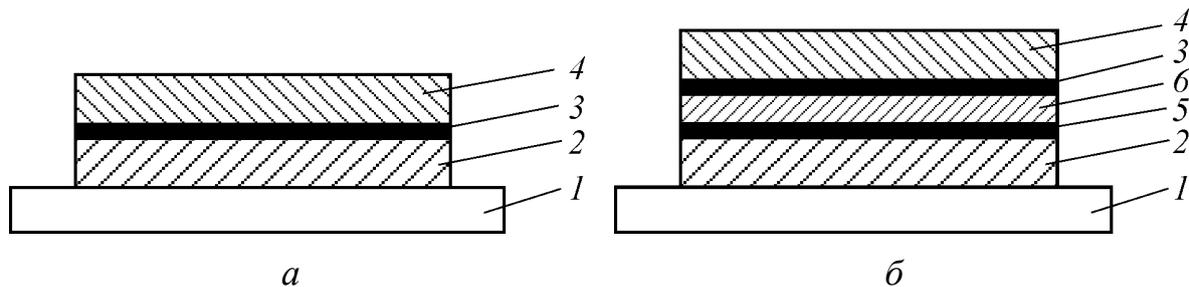


Рисунок 1 - Схематическое изображение стандартного (а) и предложенного нами (б) магниторезистивного элемента памяти: 1 – подложка, 2 и 4 – ферромагнитные электроды, 3 и 5 – две идентичные по составу и толщине диэлектрические наноразмерные пленки, 6 – наноразмерный слой того же ферромагнитного металла, что и электроды 2 и 4

Иной путь увеличения спиновой поляризации туннелирующих электронов заключается в использовании оксидных барьеров с определенной кристаллографической поляризацией. Однако, как неоднократно отмечалось в литературе [5], возникающий при этом сравнительно большой разброс физических параметров делает невозможной реализацию соответствующих схем высокой интеграции в промышленных условиях. В 2013 году в работе [5] была предложена новая магниторезистивная ячейка памяти, в которой между ферромагнитным металлическим слоем-инжектором 2 и наноразмерной пленкой диэлектрика 3 располагается дополнительный слой органических молекул. Гибридизация электронных состояний с соответствующими молекулярными орбиталями в ферромагнетике приводит к тому, что органические молекулы играют роль спиновых фильтров. При этом степень спиновой поляризации туннелирующих в детектор электронов существенно возрастает. В частности, его величина для контакта пермаллоя со сверхтонким слоем органических молекул достигает 38 процентов уже при комнатной температуре [6]. Недостатком подобного устройства является присутствие органических молекул внутри магниторезистивных элементов памяти, что приводит к необходимости радикального изменения существующей технологии изготовления схем высокой интеграции. В результате существенно

повысится себестоимость разработки технологических линий и производства микросхем памяти.

Описание

С целью сохранения существующих технологических подходов, основанных на использовании многослойных структур из неорганических материалов, в данной работе мы предлагаем использовать для увеличения спиновой поляризации туннелирующих электронов принципиально новый спиновый фильтр, основанный на эффекте размерного квантования в дополнительной ферромагнитной пленке. Предлагаемый нами спиновый фильтр представляет собой две сверхтонкие диэлектрические пленки 3 и 5, идентичные по составу и толщине, между которыми расположен наноразмерный слой 6 ферромагнитного 3d-металла (рис. 1,б). В наноразмерной пленке 6 толщиной l благодаря квантовому размерному эффекту образуются отдельные энергетические уровни. Поскольку значения фермиевских волновых векторов для электронов из зон с различной спиновой ориентацией – со спином вверх (k_F^\uparrow) и вниз (k_F^\downarrow) – значительно отличаются друг от друга ($k_F^\uparrow \neq k_F^\downarrow$), то соответствующие энергетические уровни различны, и вероятность прохождения электронов через ферромагнитную пленку 6 будет зависеть от направления их спинов. Энергетические уровни внутри наноразмерной проводящей пленки возникают для тех значений волновых векторов k_F^\uparrow , при которых имеет место усиление электронных волн: $2k_F^\uparrow l \approx 2n\pi$, где n – произвольное целое число. Известно, что электронные волны полностью ослабляют друг друга, если $2k_F^\downarrow l \approx (2m+1)\pi$, где m – произвольное целое число. Путем подбора толщины l ферромагнитной пленки 6 (рис. 1,б) и ее кристаллографической ориентации можно добиться того, что для электронов с преимущественным направлением спинов будет наблюдаться конструктивная интерференция электронных волн, а для электронов с противоположным направлением спинов – деструктивная. Этот принцип лежит в основе предлагаемого нами спинового фильтра.

Вольт-амперные ($I-V$) характеристики слоистых гибридных структур будем рассчитывать по методике, предложенной в работе [7]. Согласно [7] транспортные свойства квантово-когерентного мезоскопического проводника при заданном напряжении смещения V полностью определяются набором вероятностей прохождения электрона со спином σ и энергией E сквозь данную структуру

$D_{i,\sigma}(E,V)$, являющихся собственными значениями матрицы перехода, представляющей собой произведение матрицы рассеяния на эрмитово-сопряженную. Индекс i отвечает разным каналам проводимости, в частности, в трехмерной планарной гетероструктуре он соответствует различным углам падения θ , которые электронные импульсы образуют с нормалью к границам раздела слоев. Для того, чтобы оценить эффективность предложенного спинового фильтра, рассчитаем дифференциальную проводимость $G(V) = dI(V)/dV$ гетероструктуры, изображенной на рис. 1,б, в которой верхний электрод 4 является немагнитным металлом. При температуре $T = 0$ получим, что [7]

$$G(V) = \frac{e^2}{h} \sum_{i,\sigma} \int_{S_\sigma} \frac{d^2 k_{\parallel}}{(2\pi)^2} D_{i,\sigma}(E = eV), \quad (1)$$

где k_{\parallel} – параллельная интерфейсам компонента волнового вектора. Заметим, что в отличие от стандартного туннельного перехода с немагнитными электродами в данном случае суммирование ведется по двум различным проекциям плоскостей постоянной энергии $S_\sigma (\sigma = \uparrow, \downarrow)$. Индекс i соответствует разным углам падения θ .

Рассчитаем вероятность прохождения электрона с определенным спином через спиновый фильтр, изображенный на рис. 1,б. Существует бесконечное множество путей перехода из одного электрода в другой через двухбарьерный участок с несверхпроводящей металлической прослойкой толщиной l . Простейший включает в себя прохождение через два барьера с амплитудами $t_1 = t_2 = t(\mathbf{k}) = -i \cos \theta / (Z - i \cos \theta)$, где $Z = U_0 d / (\hbar v_F)$, U_0 и d – высота и толщина барьера, v_F – фермиевская скорость; при этом набег фазы при движении заряда между барьерами $\varphi = kl \cos \theta$ [7]. Второй вариант – это два дополнительных отражения от барьеров с амплитудами $r_1 = r_2 = r(\mathbf{k}) = -Z / (Z - i \cos \theta)$ [7] и дополнительный набег фазы, равный 2φ . Третий вариант – четыре отражения от барьеров с набегом фазы 4φ и т.д.

Сумма всех вкладов для определенного i -го канала (индекс i опускаем) равна

$$P_i = t_1 \exp(i\varphi) t_2 (1 + r_1 \exp(2i\varphi) r_2 + r_1 \exp(2i\varphi) r_2 r_1 \exp(2i\varphi) r_2 + \dots) = \frac{t_1 \exp(i\varphi) t_2}{1 - r_1 \exp(2i\varphi) r_2}. \quad (2)$$

Тогда вероятность туннелирования сквозь предложенный нами спиновый фильтр в i -ом канале

$$D = \left| \frac{\rho}{\rho_0} \right|^2 = \frac{1}{1 + \left[2 - |t_1|^2 - |t_2|^2 - 2 \operatorname{Re} \{ r_1 r_2 \exp(2i\varphi) \} \right] \left(|t_1|^2 |t_2|^2 \right)^{-1}}. \quad (3)$$

Подставляя (3) в (1), получим дифференциальную проводимость в одном из спиновых каналов. При достаточно малых напряжениях смещения она является константой.

Рассмотрим магниторезистивный элемент памяти с железом в качестве ферромагнитной пленки b (рис. 1, b). При комнатной температуре кристаллическая решетка железа – кубическая объемноцентрированная. Элементарная ячейка представляет собой куб с ребром 0.29 нанометра. Согласно расчетам [8], доминирующими носителями туннельного тока являются электроны d -зон, причем энергии Ферми двух зон с разными направлениями электронных спинов равны в железе 2.25 эВ для электронов со спинами преимущественного направления (спин вверх) и 0.35 эВ для электронов с противоположно ориентированными спинами (спин вниз), что соответствует значениям фермиевских волновых векторов 7.6 нм^{-1} для спинов вверх и 3.0 нм^{-1} для спинов вниз. Если толщина ферромагнитной прослойки b , ориентированной вдоль одного из ребер куба, равна 13 атомным слоям, т.е. составляет 3.7 нанометра, то для электронов с преимущественным направлением спина имеет место конструктивная интерференция $2k_{\text{F}}^{\uparrow} l \approx 2n\pi$, где $n = 9$, а для электронов с противоположным спином – деструктивная интерференция с $2k_{\text{F}}^{\downarrow} l \approx (2m + 1)\pi$, где $m = 3$.

Основная трудность практической реализации предложенной в данной работе гетероструктуры заключается в неоднородности ферромагнитной прослойки по толщине. Методика, предложенная в [7], позволяет учесть возможный разброс параметра l . Результаты численных расчетов влияния шероховатости прослойки b (рис. 1, b) на эффективность спиновой фильтрации, которую мы определяем как $\gamma = (G_{\uparrow}(V) - G_{\downarrow}(V)) / (G_{\uparrow}(V) + G_{\downarrow}(V))$ представлены на рис. 2. При расчете мы предположили, что исходная эффективность ферромагнитного инжектора 2 (без дополнительного фильтра) составляет 20 процентов.

Из рис. 2 видно, что разброс толщин ферромагнитной прослойки играет незначительную роль при средних значениях $l_0 < 2 \text{ нм}$, причем даже с учетом ее шероховатости степень спиновой фильтрации может возрасти в 4–5 раз. Заметим также, что с помощью предложенного спинового фильтра можно менять даже знак спиновой поляризации.

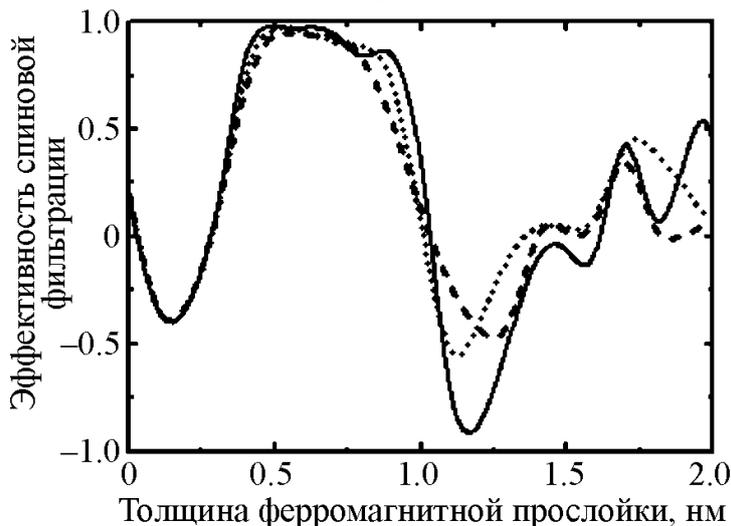


Рисунок 2 - Влияние разброса толщин ферромагнитной прослойки на зависимость эффективности спиновой фильтрации от средней толщины l_0 : $l = l_0$ (сплошная линия), $l = (1 \pm 0.1)l_0$ (точечная линия), $l = (1 \pm 0.2)l_0$ (штриховая линия). Основные параметры расчета указаны в тексте

Заклучение

Таким образом, нами теоретически обоснован новый метод создания источника спин-поляризованных электронов с помощью квантового размерного эффекта в ферромагнитной пленке наноразмерной толщины. Математическое моделирование зарядового транспорта в многослойных структурах показало, что разброс толщин такой пленки, неизбежный при промышленном производстве, существенно не влияет на величину спиновой поляризации. Благодаря этому можно существенно расширить функциональные возможности спинтронных устройств, используемых в современной вычислительной технике.

Список литературы

1. Ферт А. Происхождение, развитие и перспективы спинтроники. Нобелевская лекция / А. Ферт // Успехи физических наук. – 2007. – 178, вып. 12. – С. 1336–1348.
2. Moodera J.S. Spin polarized tunneling in ferromagnetic junctions / J.S. Moodera, J. Mathon // Journal of Magnetism and Magnetic Materials. – 1999. – 200, No. 1–3. – P. 248–273.
3. Moodera J.S. Ferromagnetic–insulator–ferromagnetic tunneling: Spin-dependent tunneling and large magnetoresistance in trilayer junctions (invited) / J.S. Moodera, L.R. Kinder // Journal of Applied Physics. – 1996. – 79, No. 8. – P. 4724–4729.
4. Santos T.S. Observation of spin filtering with a ferromagnetic EuO tunnel barrier / T.S. Santos, J.S. Moodera // Physical Review B. – 2004. – 69, No. 24. – P. 241203-1–241203-4.

5. Steil S. Spin-dependent trapping of electrons at spinterfaces / S. Steil, N. Großmann, M. Laux, A. Ruffing, D. Steil, M. Wiesenmayer, S. Mathias, O.L.A. Monti, M. Cinchetti, M. Aeschlimann // Nature Physics. – 2013. – 9, No. 4. – P. 242–247.
6. Santos T.S. Room-temperature tunnel magnetoresistance and spin-polarized tunneling through an organic semiconductor barrier / T.S. Santos, J.S. Lee, P. Migdal, I.C. Lekshmi, B. Satpati, J.S. Moodera // Physical Review Letters. – 2007. – 98, No. 1. – P. 016601-1–016601-4.
7. Belogolovskii M. Phase-breaking effects in superconducting heterostructures / M. Belogolovskii // Physical Review B. – 2003. – 67, No. 10. – P. 100503(R)-1–100503(R) -4.
8. Davis A.H. Spin dependent tunneling at finite bias / A.H. Davis, J.M. MacLaren // Journal of Applied Physics. – 2000. – 87, No. 9. – P. 5224–5226.

Поступила в редакцію 18.10.2013 р. рецензент: д.ф.-м.н Медведев Ю.В.

В.В. Шамаєв¹, О.В. Василенко², Т.О. Хачатурова²

¹Донецький національний технічний університет

²Донецький фізико-технічний інститут ім. О.О. Галкіна НАН України

Моделювання роботи спінового фільтра, що базується на квантовому розмірному ефекті. У даній роботі запропоновано і теоретично обґрунтовано новий метод збільшення спінової поляризації тунелюючих електронів у багатошарових структурах за допомогою квантового розмірного ефекту у ферромагнітній металевій плівці нанорозмірної товщини. Математичне моделювання зарядового транспорту в структурах, що проводять, показало, що розкид товщини такої плівки, який є неминучим в умовах промислового виробництва, не впливає істотним чином на обговорюваний ефект. Це дозволить створити нові спінтронні пристрої для обчислювальної техніки з набагато більшою ефективністю, ніж існуючі.

Ключові слова: Математичне моделювання зарядового транспорту, квантова електроніка, спін-поляризований струм, ферромагнітні плівки, розмірний ефект

V.V. Shamaev¹, A.V. Vasilenko², T.A. Khachaturova²

¹Donetsk National Technical University

²Donetsk Institute for Physics and Engineering named by O.O. Galkin, National Academy of Sciences of Ukraine

Mathematical modeling of the work of a spun filter based on the quantum size effect. A new approach to create an ensemble of electrons or holes with an imbalance between different spin-orientation states is proposed. It is based on the tunneling across an insulator-ferromagnetic metal interlayer-insulator system with constructive interference for spin-up electron waves and destructive one for those with spin-down states. We have developed a consistent quantum-mechanical model of transport phenomena in complex solid-state systems. Our calculations have been done for multilayered structures formed by 3d ferromagnetic and insulating films. Mathematical modeling of the charge transport processes has shown that the spin filtering proposed by us can result in strong increase of the

polarization of conduction electrons since the electron transmission coefficient through the structure is sharply peaked and strongly suppressed about certain energies. A magnetoresistive memory element with iron as a ferromagnetic film has been studied theoretically. In iron *d*-band electrons are dominating carriers of the tunnel current. Fermi energies of two bands with opposite directions of electron spins are equal to 2.25 eV for electrons with dominated-direction spins and 0.35 eV for electrons with opposite oriented spins that corresponds to Fermi wave vectors 7.6 nm^{-1} and 3.0 nm^{-1} , respectively. When the thickness of the ferromagnetic interlayer oriented along one of the main directions of the crystal cell equals to 13 atomic layers, i.e., equals to 3.7 nm then the constructive interference takes place for electrons with a dominating-direction spins with a destructive interference for electrons with the opposite spin. In this case the effect can reach hundred percents. With the proposed model we have studied numerically an effect of the ferromagnetic interlayer roughness on the spin-filtering efficiency. The novel mechanism of the spin-dependent dynamics in hybrid heterostructures with ferromagnetic layers ultimately lays the foundation for designing advanced actively controlled spintronic devices for computer engineering. The mathematical model proposed in this work adequately describes the charge transport processes in such systems.

Keywords: Mathematical modeling of the charge transport, quantum electronics, spin-polarized current, ferromagnetic films, size effect