

05

Переключение магнитного перехода совместным действием импульса тока и магнитного поля. Численное моделирование

© Ю.В. Гуляев, П.Е. Зильберман, С.Г. Чигарёв, Э.М. Эпштейн

Институт радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН
(Фрязинский филиал), Фрязино, Московская обл.
E-mail: zil@ms.ire.rssi.ru

Поступило в Редакцию 23 августа 2010 г.

Приводятся результаты численного моделирования переключения магнитного перехода импульсом спин-поляризованного тока в присутствии внешнего магнитного поля при величинах плотности тока и напряженности поля, меньших соответствующих пороговых значений. Показана возможность переключения с регулируемым запаздыванием относительно импульса тока.

Эффект переключения магнитных переходов спин-поляризованным током [1] пользуется неослабевающим вниманием исследователей — как экспериментаторов, так и теоретиков. Это связано как с перспективой практического применения эффекта для высокоплотной записи информации током в магнитных средах, так и с интересными задачами, возникающими при попытках теоретической интерпретации экспериментальных результатов и предсказания новых эффектов.

В области экспериментального исследования и применения эффекта существуют две важные проблемы: понижение порога переключения и укорочение импульсов тока, вызывающих переключение. Их решение способствовало бы уменьшению джоулева нагрева слоев перехода и устраняло возможность разрушения переключаемых элементов протекающим током.

К настоящему времени предложено несколько вариантов снижения пороговой плотности тока, соответствующих возникновению неустойчивости исходной конфигурации и переключению в другую конфигурацию, обладающую иным электрическим сопротивлением. Сюда относятся выбор материала барьерного слоя [2], использование разбавленных

магнитных полупроводников при создании закрепленного и свободного слоев перехода [3], подбор параметров слоев для получения высокого уровня спиновой инжекции [4], использование неколлинеарной исходной конфигурации [5–8]. В работе [9] было обращено внимание на возможность значительного снижения пороговой плотности тока, необходимой для переключения магнитного перехода, за счет внешнего магнитного поля ниже порога ориентационного фазового перехода. Подчеркнем, что участие магнитного поля в процессе переключения не нарушает локального характера обменного переключения, поскольку магнитное поле такой величины не в состоянии совершить переключение самостоятельно. Оно лишь подводит систему к порогу неустойчивости, вызванной обменным взаимодействием носителей тока с магнитной решеткой. В силу локальности обмена (на атомном масштабе) переключение также получается локальным. Наряду со снижением пороговой плотности стационарного тока присутствие магнитного поля открывает возможность производить переключение короткими импульсами тока. Варьирование амплитуды и длительности импульса позволяет проводить переключение с запаздыванием относительно импульса. Данная нелинейная задача решается в работе численно.

Рассматривается „магнитный переход“, т.е. слоистая структура, составленная из следующих контактирующих слоев: слоя 1 — ферромагнетика с закрепленным вектором намагниченности, слоя 2 — ферромагнетика со свободным вектором намагниченности и немагнитного слоя 3, замыкающего электрическую цепь. При движении носителей тока в направлении $1 \rightarrow 3$ в свободном слое 2 возникает область неравновесной спиновой поляризации электронов за счет спиновой „инжекции“ [4], которая, как подробно показано в [9], оказывается достаточно сильной.

В указанных условиях намагниченность свободного слоя в присутствии нестационарного тока $j(t)$, перпендикулярного к слоям, описывается нелинейным уравнением вида

$$\begin{aligned} \frac{d\hat{\mathbf{M}}}{dt} - \kappa \left[\hat{\mathbf{M}}, \frac{d\hat{\mathbf{M}}}{dt} \right] + \gamma [\hat{\mathbf{M}}, \mathbf{H}] + \gamma H_a (\hat{\mathbf{M}}\mathbf{n}) [\hat{\mathbf{M}}, \mathbf{n}] \\ + \gamma [\hat{\mathbf{M}}, \mathbf{H}_d] + \gamma H_a \frac{j(t)}{j_0} [\hat{\mathbf{M}}, \hat{\mathbf{M}}_1] = 0. \end{aligned} \quad (1)$$

Здесь $\hat{\mathbf{M}} = \mathbf{M}/|M|$ — единичный вектор в направлении (пространственно однородной) намагниченности \mathbf{M} свободного слоя, \mathbf{H} —

внешнее магнитное поле, \mathbf{H}_d — размагничивающее поле, H_a — поле анизотропии, \mathbf{n} — единичный вектор в направлении оси анизотропии, \mathbf{M}_1 — единичный вектор в направлении намагниченности закрепленного слоя, κ — гильбертов коэффициент решеточного затухания, γ — гиромагнитная постоянная;

$$j_0 = \frac{eH_aL}{\mu_B\alpha\tau Q_1} \quad (2)$$

имеет смысл пороговой плотности тока при переключении магнитного перехода стационарным током (бесконечно длинным импульсом) в отсутствие магнитного поля, μ_B — магнетрон Бора, α — константа $s d$ -обменного взаимодействия, τ — время спиновой релаксации электронов, L — толщина свободного слоя, Q_1 — спиновая поляризация проводимости закрепленного (инжектирующего) слоя. Последнее слагаемое в левой части уравнения (1) описывает воздействие спин-поляризованного тока на магнитную решетку за счет спиновой инжекции. Численное решение получено для конфигурации, в которой $\mathbf{H} = \{0, 0, H\}$, $\mathbf{n} = \{0, 0, 1\}$, $\mathbf{H}_d = -4\pi M\{\mathbf{M}_x, 0, 0\}$, $\mathbf{M}_1 = \{0, 0, 1\}$; ось x направлена вдоль тока, плоскость yz совпадает с плоскостью слоев, полярная ось ориентирована вдоль z . Численное решение уравнений (3), (4) проводилось с помощью программы Simulink в системе MATLAB [10]. Были заданы следующие значения параметров: $\kappa = 0.03$, $h_a = 0.01$ при антипараллельной относительной ориентации закрепленного и свободного слоев. При достаточно большой величине плотности тока и/или магнитного поля такая конфигурация становится неустойчивой, но для начала переключения необходим начальный толчок, реально обеспечиваемый тепловыми флуктуациями.

Временная зависимость плотности спин-поляризованного тока $j(t)$ задавалась в виде прямоугольного импульса длительностью w . Выбранные значения величины магнитного поля и амплитуды импульса соответственно $H = 0.9H_a$ и $j = 0.9j_0$ (90% пороговых значений) исключали возможность переключения перехода полем или током в отдельности, так что переключение, описываемое полученным решением, вызвано совместным действием тока и магнитного поля.

Ниже представлены результаты численного решения в виде зависимости от времени угла отклонения вектора намагниченности свободного слоя от исходной антипараллельной ориентации. По оси абсцисс откладывается безразмерное время, в качестве масштаба выбрана

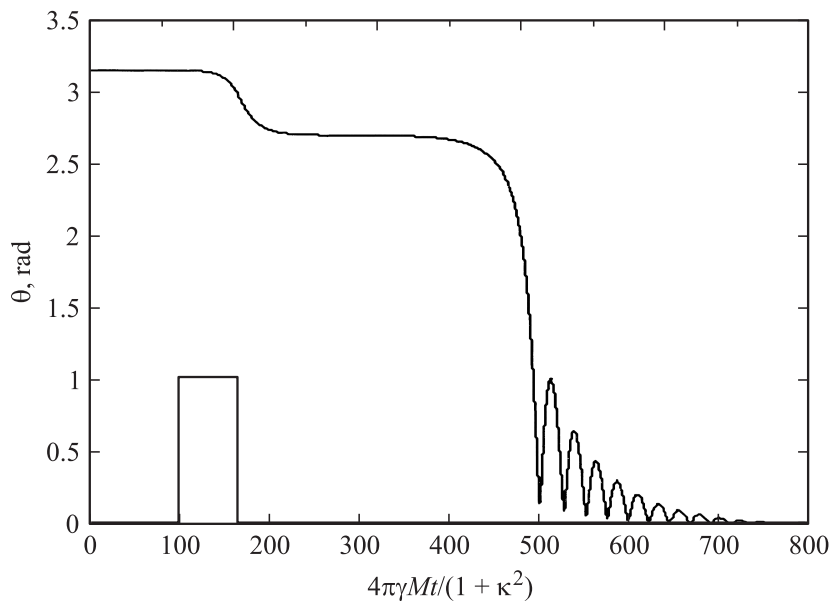


Рис. 1. Временная зависимость угла отклонения вектора намагниченности свободного слоя от исходной антипараллельной ориентации при переключении совместным действием импульса тока и магнитного поля. $j/j_0 = 0.9$, $H/H_a = 0.9$, $w = 67.15t_0$.

величина $t_0 = (1 + \kappa^2)/(4\pi\gamma M)$; при $M = 900 \text{ G}$ одной наносекунде соответствуют 200 делений шкалы оси абсцисс ($t_0 = 0.005 \text{ ns}$). Ступенька показывает моменты включения и выключения тока.

Заданным значениям магнитного поля и амплитуды импульса тока соответствует некоторая минимальная длительность импульса, при которой еще происходит переключение. На рис. 1 показана зависимость от времени угла отклонения вектора намагниченности свободного слоя от исходной антипараллельной ориентации при $w = 67.15t_0$. Видно, что имеет место переключение со значительным запаздыванием относительно импульса. При заданных значениях магнитного поля и амплитуды импульса тока это значение w является пороговым: при уменьшении длительности импульса всего на $0.01t_0$ переключения не происходит

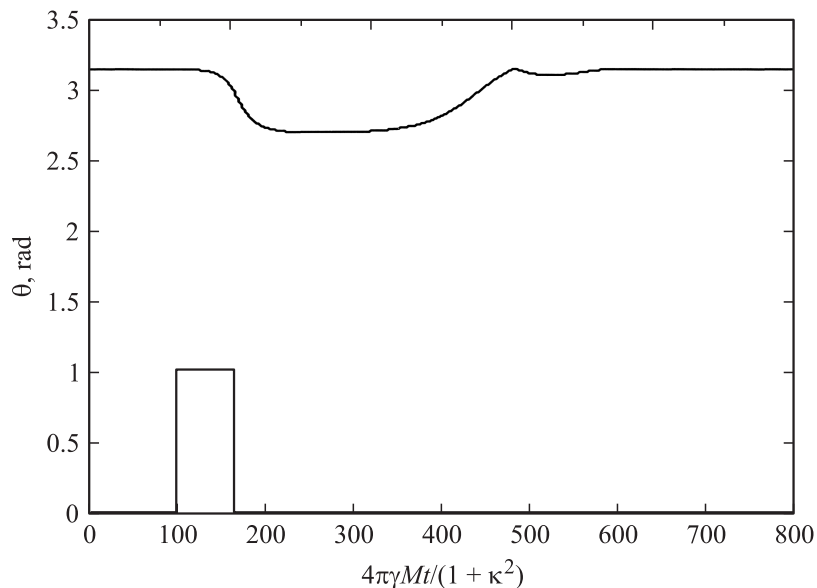


Рис. 2. Временная зависимость угла отклонения вектора намагниченности свободного слоя от исходной антипараллельной ориентации при длительности импульса, меньшей порогового значения. $j/j_0 = 0.9$, $H/H_a = 0.9$, $w = 67.14t_0$.

(рис. 2). При увеличении длительности импульса время запаздывания переключения убывает (рис. 3).

При типичных значениях параметров ($H_a = 100$ Г, $M = 900$ Г, $L = 10^{-7}$ см, $\tau = 10^{-12}$ с, $Q_1 = 0.1$) переключению, показанному на рис. 1, соответствует магнитное поле $H = 90$ Г, плотность тока $j = 5 \cdot 10^5$ А/см², длительность импульса $w = 0.34$ нс; время запаздывания переключения в этих условиях составляет приблизительно 1.5 нс.

При удлинении импульса переключение становится возможным при меньших значениях магнитного поля и/или плотности тока. В пределе импульсов, длинных по сравнению с периодом прецессии, условие переключения принимает вид, соответствующий случаю стационарного тока [4,11]:

$$\frac{H}{H_a} + \frac{j}{j_0} > 1. \quad (3)$$

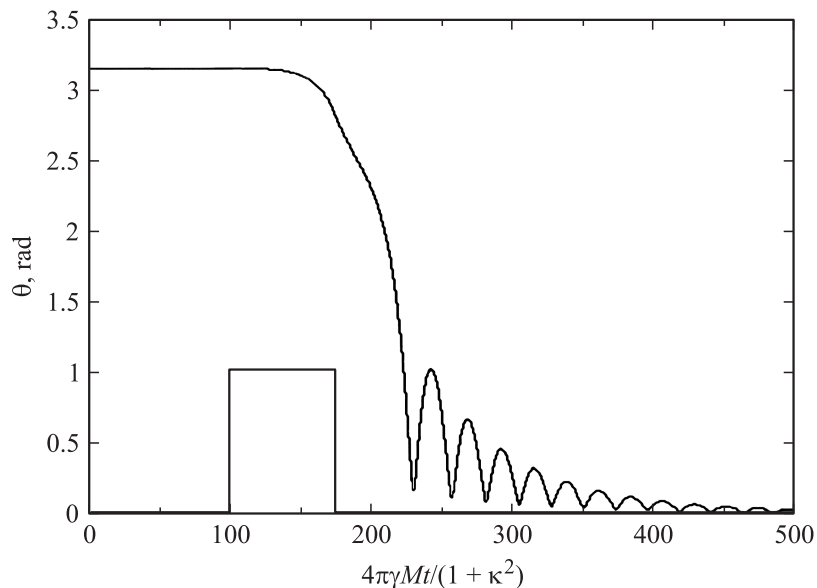


Рис. 3. Уменьшение (ср. с рис. 2) временного запаздывания переключения при удлинении импульса. $j/j_0 = 0.9$, $H/H_a = 0.9$, $w = 75t_0$.

Из рис. 1 видно, что вблизи порога переключение происходит в два этапа, причем более продолжительная часть этого процесса реализуется уже после выключения импульса тока. Этот факт можно интерпретировать следующим образом. Известно, что для переключения вектора намагниченности антипараллельным магнитным полем величина последнего должна превышать поле анизотропии H_a . Если исходное положение вектора намагниченности не точно антипараллельно внешнему магнитному полю, а отклонено от антипараллельного направления на некоторый угол ψ , то для переключения в параллельное положение требуется магнитное поле $H > H_a \cos \psi \equiv H_c$ [11], тем меньшее, чем больше это отклонение. Роль токового импульса состоит в том, что он, действуя совместно с магнитным полем, за время своего действия успевает отклонить вектор намагниченности от антипараллельного направления на угол, достаточно большой для того, чтобы после выключения импульса магнитное поле было в

состоянии с переключением „справиться в одиночку“. Длительное время переключения после выключения импульса связано с тем, что в случае, представленном на рис. 1, этот угол близок к H_c , а время переключения магнитным полем растет по мере приближения к этому критическому значению [11].

Полученные результаты указывают на возможность совместного переключения магнитных переходов магнитным полем и импульсом тока, при этом варьирование амплитуды и длительности импульса позволяет при необходимости получать переключение с временной задержкой регулируемой величины.

Список литературы

- [1] *Katine J.A., Albert F.J., Buhrman R.A., Myers E.B., Ralph D.C.* // Phys. Rev. Lett. 2000. V. 84. N 14. P. 3149.
- [2] *Diao Z., Li Z., Wang S., Ding Y., Panchula A., Chen E., Wang L.-C., Huai Y.* // J. Phys.: Condens. Matter. 2007. V. 19. N 16. P. 165 209.
- [3] *Watanabe M., Okabayashi J., Toyao H., Yamaguchi T., Yoshino J.* // Appl. Phys. Lett. 2008. V. 92. N 8. P. 082 506.
- [4] *Гуляев Ю.В., Зильберман П.Е., Крикунов А.И., Эпштейн Э.М.* // ЖТФ. 2007. Т. 77. В. 9. С. 67.
- [5] *Brataas A., Nazarov Y.V., Bauer G.E.W.* // Eur. Phys. J. B. 2001. V. 22. N 1. P. 99.
- [6] *Chung N.L., Jalil M.B.A., Tan S.G., Guo J., Bala Kumar S.* // J. Appl. Phys. 2008. V. 104. N 8. P. 084 502.
- [7] *Mankoff F.B., Dave R.W., Rizzo N.D., Eschrich T.C., Engel B.N., Nehrani S.* // Appl. Phys. Lett. 2003. V. 83. N 8. С. 1596.
- [8] *Chigarev S.G., Epshtein E.M., Zilberman P.E.* // Phys. Status Solidi. B. 2010. V. 247. N 2. P. 325.
- [9] *Гуляев Ю.В., Зильберман П.Е., Панас А.И., Эпштейн Э.М.* // ЖЭТФ. 2008. Т. 134. № 6. С. 1200.
- [10] *Karris S.T.* Introduction to Simulink with Engineering Applications. Orchard Publications, 2006.
- [11] *Эпштейн Э.М.* // РнЭ. 2009. Т. 54. № 3. С. 339.