

05,03

# Модель магнитного туннельного перехода на Verilog-A для использования в средах автоматизированного проектирования интегральных схем

© М.Д. Лобкова<sup>1</sup>, П.Н. Скирдков<sup>1,2</sup>, К.А. Звездин<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup> Новые спинтронные технологии, Российский квантовый центр, Инновационный центр Сколково, Московск. обл., Москва, Россия

<sup>2</sup> Институт общей физики им. А.М. Прохорова РАН, Москва, Россия

E-mail: m.shkanakina@nst.tech

Поступила в Редакцию 17 апреля 2023 г.

В окончательной редакции 17 апреля 2023 г.

Принята к публикации 11 мая 2023 г.

Разработана электрофизическая модель магнитного туннельного перехода на языке Verilog-A, что позволяет использовать ее в различных системах автоматизированного проектирования интегральных схем и моделировать спинтронные устройства совместно с компонентами на основе комплементарных структур металл–оксид–полупроводник. Для качественной верификации модели разработаны и проведены тесты, соответствующие основным режимам работы магнитного туннельного перехода: переключение, генерация, выпрямление. Разработанная электрофизическая модель является легко масштабируемой под разные уровни технологии, поскольку ее свойства изменяются относительно заданных геометрических размеров магнитного туннельного перехода.

**Ключевые слова:** магнитный туннельный переход, спинтроника, спинтронные устройства, модель магнитного туннельного перехода, разработка модели магнитного туннельного перехода, режимы работы МТП.

DOI: 10.21883/FTT.2023.06.55649.06H

## 1. Введение

Спинтроника или спиновая электроника представляет собой быстро развивающееся перспективное направление микро- и нанoeлектроники. Носителем информации в спинтронных компонентах является не только заряд электрона, но и его спин [1]. Спинтронные устройства, такие как магниторезистивные сенсоры, магниторезистивная оперативная память с произвольным доступом (MRAM) [2–4], включают в себя сочетание КМОП-схемы (комплементарная структура металл–оксид–полупроводник) и спинтронной части, где в качестве основных элементов выступают магнитные туннельные переходы (МТП). Магнитный туннельный переход в простейшем случае состоит из двух ферромагнитных слоев, разделенных диэлектриком. Нижний ферромагнитный слой с фиксированной ориентацией намагниченности называется опорным или поляризатором, а верхний ферромагнитный слой имеет переменную ориентацию намагниченности и называется свободным (рис. 1). Если намагниченности свободного слоя и опорного сонаправлены, то МТП имеет минимальное сопротивление, и его состояние называется параллельным (П), а состояние, при котором намагниченности противоположно направлены, называют антипараллельным (АП), и оно характеризуется максимальным сопротивлением.

В последнее десятилетие много исследований связано с эффектом переноса спина [5], это вызвано перспективой коммерческого внедрения устройств сверхвысоко-частотной (СВЧ) спинтроники. В настоящее время активно развиваются технологии таких спинтронных СВЧ-устройств, как наногенераторы [6], спиновые диоды [7], радиочастотные детекторы, харвестеры [1]. В связи с чем возникает необходимость в моделировании их электронных схем, представляющих из себя КМОП-

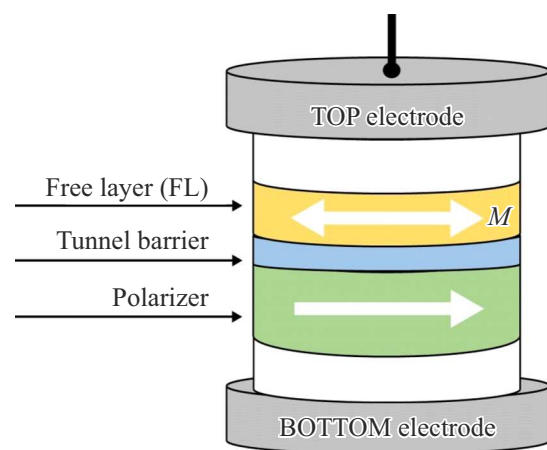


Рис. 1. Стек магнитного туннельного перехода

элементы, работающие совместно со спинтронными, и учитывающих СВЧ-свойства магнитных туннельных переходов. Актуальным является создание компактной модели МТП, позволяющей рассчитывать электрические характеристики элемента и применять эти данные в распространенных средах автоматизированного проектирования интегральных схем (САПР).

Мы представляем компактную модель магнитного туннельного перехода, написанную на языке высокого уровня Verilog-A/AMS, для предсказательного моделирования поведения МТП в спинтронных устройствах. Для качественной верификации модели в САПР Cadence ADE мы разработали и провели тесты, соответствующие основным режимам работы МТП, а именно: переключения, генерации и выпрямлению.

## 2. Структура компактной модели МТП

Модель магнитного туннельного перехода представляет собой единый модуль (рис. 2), включающий в себя:

- численное решение уравнения Ландау–Лифшица–Гильберта–Слончевского (LLGS) [5], описывающего динамику намагниченности  $\mathbf{M}$  свободного слоя МТП под действием внешнего магнитного поля и учитывающего анизотропию формы и эффект переноса спина

$$\dot{\mathbf{M}} = -\gamma[\mathbf{M} \times \mathbf{H}_{eff}] + \alpha/M_s[\mathbf{M} \times \dot{\mathbf{M}}] + \mathbf{T}_{STT}, \quad (1)$$

где  $\gamma$  — гиромагнитное отношение,  $\mathbf{H}_{eff}$  — эффективное магнитное поле,  $\alpha$  — коэффициент затухания Гильберта,  $M_s$  — намагниченность насыщения.  $\mathbf{T}_{STT}$  — крутящий момент, состоящий из двух компонентов: крутящий момент Слончевского  $T_{ST} = (a_j \gamma / M_s) \mathbf{M} \times [\mathbf{p} \times \mathbf{M}]$  и крутящий момент поля  $T_{FLT} = \gamma b_j [\mathbf{M} \times \mathbf{p}]$ , где  $\mathbf{p}$  — нормализованный вектор намагниченности опорного слоя,  $j$  — плотность тока, вычисляемая по формуле  $j = I_{in}(t)/S$ ,  $I_{in}$  — ток, протекающий через МТП,  $S$  — площадь свободного слоя МТП. Величины  $b_j \approx 0.4a_j$ ,  $a_j = \hbar P / (2teM_s)$ , где  $P$  — степень поляризации тока,  $t$  — толщина свободного слоя, и  $e$  — заряд электрона. Для моделирования был взят МТП с эллиптическим основанием с геометрическими размерами  $a$  (большая полуось эллипса) и  $b$  (меньшая полуось эллипса).

- вычисление туннельного магнетосопротивления (TMR) МТП и, как следствие, напряжения на его выходе

$$V_{out} = I_{in}(R_p + (1 - \mathbf{M} \cdot \mathbf{p})dR/2), \quad (2)$$

где  $dR = R_{ap} - R_p$ , а  $R_{ap}$ ,  $R_p$  — сопротивление МТП в АП- и П-состоянии соответственно.

Эффективное магнитное поле  $\mathbf{H}_{eff}$  представляет собой вариационную производную свободной энергии по намагниченности и включает в себя вклады различной природы: поля анизотропии, магнитостатики, обмена, зеемановской энергии. Мы предполагаем, что распределение намагниченности является однородным по объему образца, тогда для МТП с намагниченностью свободного

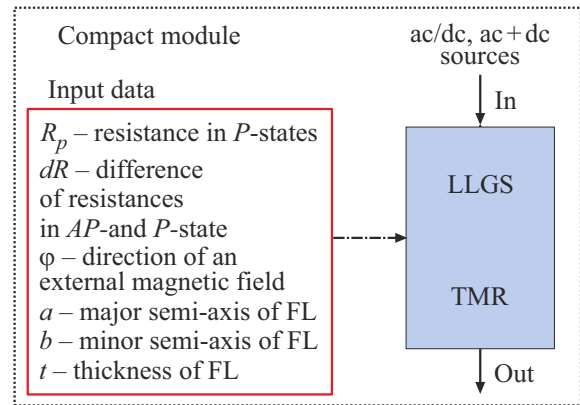


Рис. 2. Блок-схема модели МТП.

слоя в плоскости полная энергия представляет собой сумму энергии Зеемана и энергии анизотропии формы

$$E = E_z + E_{anis} = M_x H \cos(\varphi) + M_y H \sin(\varphi) + \frac{1}{2} (N_x M_x^2 + N_y M_y^2 + N_z M_z^2),$$

где размагничивающие факторы  $N_x + N_y + N_z = 4\pi$ ,  $H$  — величина внешнего магнитного поля,  $\varphi$  — направление внешнего магнитного поля относительно основной оси эллипса.

Синтаксис языка Verilog-A [8] позволяет решать уравнения типа (1) с помощью схем интегрирования *idt/idtmod* с настраиваемыми допусками во временной области.

Для верификации модели магнитного туннельного перехода на Verilog-A были разработаны тесты, которые проводились в САПР Cadence ADE. Каждый тест представляет собой начальные условия моделирования, при которых МТП входит в режим: переключения, генерации, выпрямления.

## 3. Режим переключения МТП

В спинтронных устройствах MRAM и TMR-сенсорах переключение МТП из состояния П в АП и наоборот происходит под действием внешнего магнитного поля, направленного вдоль оси легкого намагничивания свободного слоя. Для симуляции режима переключения в симуляторе интегральных схем Spectre выбрана типичная для MRAM конструкция магнитного туннельного перехода с размерами свободного слоя  $350 \times 160 \times 5$  нм и туннельным магнетосопротивлением 120%, что соответствует образцу хорошего качества, при этом сопротивление в П-состоянии (АП-состоянии)  $560 \Omega$  ( $1225 \Omega$ ). Непрерывно изменяя величину внешнего магнитного поля  $H$  от  $-500$  до  $500$  Ое, мы вычислили сопротивление МТП на каждом временном шаге (рис. 3). Переключение МТП

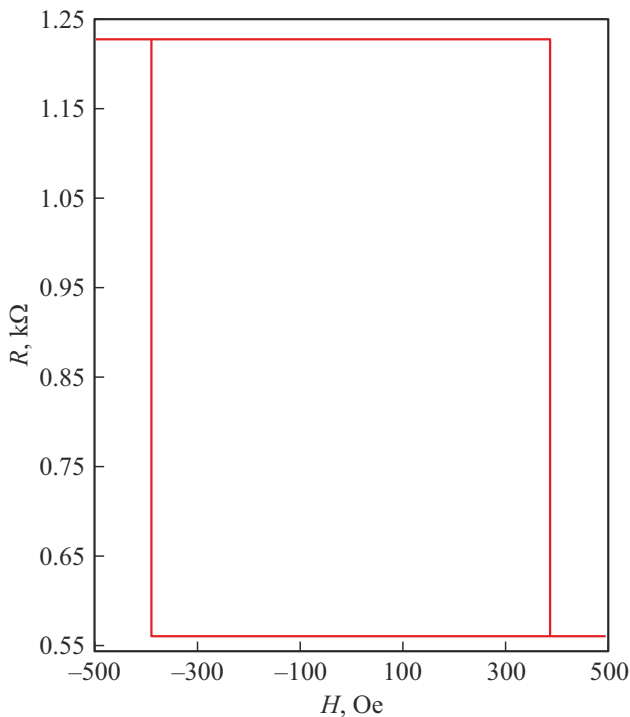


Рис. 3. Зависимость сопротивления МТП от величины внешнего магнитного поля.

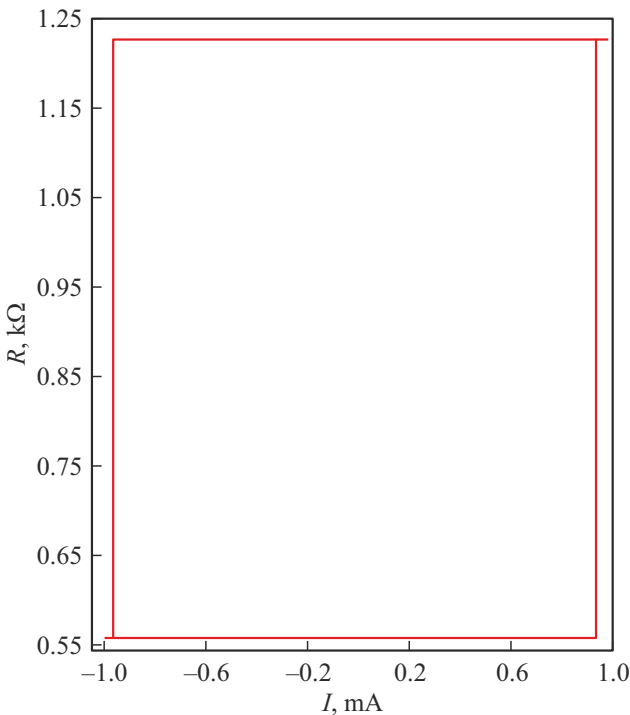


Рис. 4. Зависимость сопротивления МТП от величины постоянного тока.

АП-(П-) состояния в П-(АП-) состояние наблюдалось в поле 400 Oe ( $-400$  Oe).

Магнитная память нового поколения STT-MRAM использует схему записи информации, отличную от

MRAM, заключающуюся в перемагничивании МТП с помощью постоянного тока посредством эффекта переноса спина. Для симуляции режима переключения постоянным током выбран магнитный туннельный переход с геометрическими размерами свободного слоя  $240 \times 120 \times 2$  nm и сопротивлением в П-состоянии (АП-состоянии)  $560 \Omega$  ( $1225 \Omega$ ). В нулевом внешнем магнитном поле, изменяя величину постоянного тока  $I$  от  $-1.1$  до  $1.1$  mA, что соответствует плотности тока  $j$  в диапазоне от  $-4.86$  до  $4.86$  MA/cm<sup>2</sup>, проводилось вычисление магнетосопротивления структуры (рис. 4). Плотность тока ниже  $10$  MA/cm<sup>2</sup> обеспечивает температурную стабильность устройства и не разрушает структуру МТП, что проверено экспериментально в [9].

#### 4. Режим генерации МТП

В настоящее время возрастает интерес исследователей к наноосцилляторам на основе МТП из-за их потенциального применения для генерации микроволн гигагерцового диапазона частот. В таких устройствах постоянный ток, проходящий через МТП, вызывает прецессию намагниченности свободного слоя, что приводит к колебаниям сопротивления. Для тестирования режима генерации выбрана конструкция МТП с размерами свободного слоя  $350 \times 160 \times 5$  nm и сопротивлением в П-состоянии (АП-состоянии)  $560 \Omega$  ( $1225 \Omega$ ). При постоянном токе через МТП величиной  $1-2$  mA плотностью  $2.25-4.5$  MA/cm<sup>2</sup> (рис. 5) наблюдаются колебания сопротивления при  $1.5$  mA и  $2$  mA.

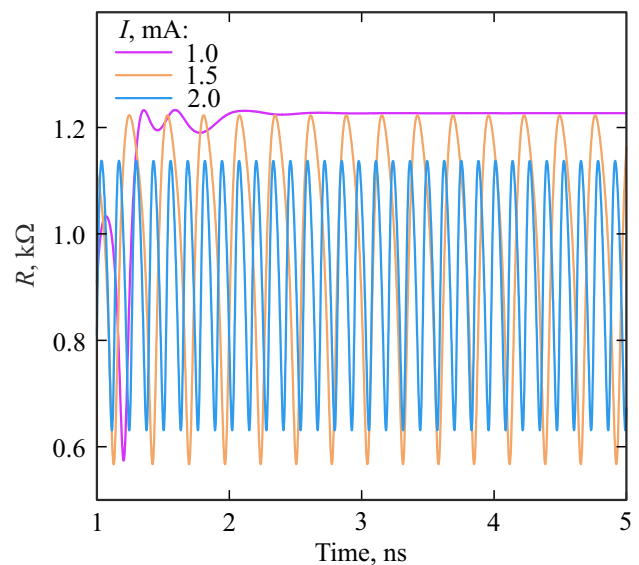
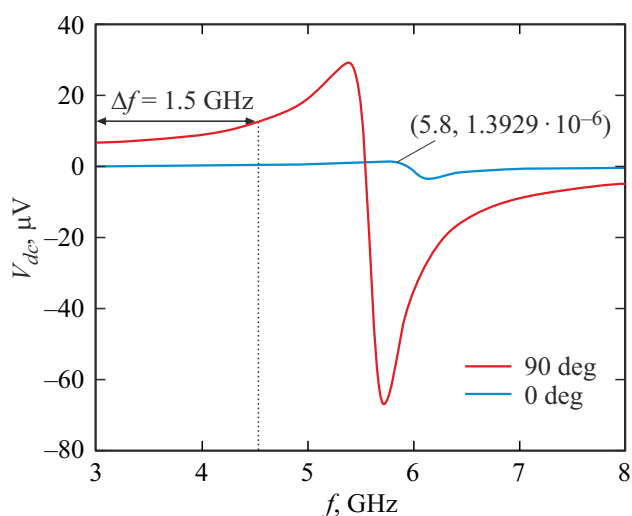


Рис. 5. Зависимость сопротивления МТП от времени при токах смещения  $I = 1-2$  mA.



**Рис. 6.** Зависимость выпрямленного напряжения МТП от частоты переменного тока амплитудой  $100 \mu\text{A}$  при направлении внешнего магнитного поля относительно основной оси эллипса  $0^\circ$  и  $90^\circ$ .

## 5. Режим выпрямления

При пропускании переменного тока через МТП структуру возникает новый динамический эффект, эффект выпрямления [10]. Когда частота переменного тока  $f$  совпадает с частотой ферромагнитного резонанса (ФМР) свободного слоя, возникают колебания сопротивления МТП. Таким образом, согласно закону Ома, на выходе структуры наблюдаются переменная и постоянная компоненты напряжения. Характерные кривые выпрямленного напряжения от частоты переменного тока представлены на рис. 6 и называются кривыми ферромагнитного резонанса (ФМР). Для тестирования режима выпрямления взята конструкция МТП с размерами свободного слоя  $350 \times 160 \times 5 \text{ nm}$ , и сопротивлением в П-состоянии (АП-состоянии)  $560 \Omega$  ( $1225 \Omega$ ). Во внешнем магнитном поле  $H = 50 \text{ Oe}$ , направленном вдоль большой оси эллипса, при пропускании переменного тока через МТП амплитудой  $100 \mu\text{A}$  и частотой  $3\text{--}8 \text{ GHz}$  наиболее эффективное выпрямление было достигнуто на частоте  $5.8 \text{ GHz}$ , соответствующей пику ФМР. При изменении направления поля до  $90^\circ$  наблюдается увеличение постоянного напряжения на выходе МТП, а также появление широкополосного выпрямления на частотах  $3\text{--}4.5 \text{ GHz}$ . Данный режим широкополосного выпрямления имеет перспективу применения в спинтронных устройствах интернета вещей [1].

## 6. Заключение

Электрофизическая модель магнитного туннельного перехода написана на языке Verilog-A и качественно верифицирована в САПР Cadence ADE. Параметрическая ячейка МТП легко масштабируема под разные уровни

технологий и может использоваться для моделирования различного рода спинтронных устройств: ТМС-сенсора, магнитной оперативной памяти, спинового диода и наногенератора.

### Финансирование работы

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (грант № 19-12-00432-П).

### Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

### Список литературы

- [1] P.N. Skirdkov, K.A. Zvezdin. *Ann. Phys.* **532**, 6, 1900460 (2020).
- [2] J. Lenz, A. Edelstein. *IEEE Sens. J.* **6**, 631 (2006).
- [3] S.I. Kiselev, J. Sankey, I. Krivorotov, N. Emley, R. Schoelkopf, R. Buhrman, D. Ralph. *Nature* **425**, 380 (2003).
- [4] J.A. Katine, F.J. Albert, R.A. Buhrman, E.B. Myers, D.C. Ralph. *Phys. Rev. Lett.* **84**, 3149 (2000).
- [5] J.C. Slonczewski. *J. Magn. Magn. Mater.* **159**, L1 (1996).
- [6] A.M. Deac, A. Fukushima, H. Kubota, H. Machara, Y. Suzuki, S. Yuasa, Y. Nagamine, K. Tsunekawa, D.D. Djayaprawira, N. Watanabe. *Nature Phys.* **4**, 803 (2008).
- [7] J. Zhu, J. Katine, G.E. Rowlands, Y.J. Chen, Z. Duan, J.G. Alzate, P. Upadhyaya, J. Langer, P.K. Amiri, K.L. Wang, I.N. Krivorotov. *Phys. Rev. Lett.* **108**, 197203 (2012).
- [8] Verilog-A/AMS Reference Manual: [https://edownload.software.keysight.com/eedl/ads/2011\\_01/pdf/verilogaref.pdf](https://edownload.software.keysight.com/eedl/ads/2011_01/pdf/verilogaref.pdf)
- [9] Y. Huai. *AAPPS bull.* **18**, 6, 33 (2008).
- [10] A. Tulapurkar, Y. Suzuki, A. Fukushima, H. Kubota, H. Machara, K. Tsunekawa, D. Djayaprawira, N. Watanabe, S. Yuasa. *Nature* **438**, 339 (2005).

Редактор Е.Ю. Флегонтова