

УДК 537.9+539.534.9+535.37

КОРРЕКТНОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ ГИСТЕРЕЗИСА НЕЛИНЕЙНЫХ ВОЛЬТ-АМПЕРНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК СПИНОВЫХ КЛАПАНОВ, МАГНИТНЫХ ТУННЕЛЬНЫХ ПЕРЕХОДОВ ИЛИ МЕМРИСТОРОВ

Е. С. Демидов *

Нижегородский госуниверситет им. Н. И. Лобачевского, г. Нижний Новгород, Россия

К настоящему времени достигнут существенный прогресс в синтезе переключаемых собственным током структур спиновых клапанов и магнитных туннельных переходов с гистерезисными зависимостями сопротивления от тока. Эти структуры представляют интерес для создания компактной электронной памяти. Однако обычно представляемый в публикациях гистерезис сопротивления не соответствует физическим принципам. В данной статье показано, как должны выглядеть не противоречащая закону сохранения энергии гистерезисная зависимость сопротивления от тока или проводимости от напряжения и соответствующая вольт-амперная характеристика. В качестве примера приводится экспериментальная вольт-амперная характеристика магнитного туннельного перехода $\text{Co}_2\text{MnSi}/\text{MgO}/\text{Co}_2\text{MnSi}$, согласующаяся с модельными гистерезисными зависимостями.

Переключаемые собственным током магнитные структуры с гистерезисными вольт-амперными характеристиками (ВАХ) представляют интерес для создания компактной магниторезистивной памяти, в которой, в отличие от систем с управлением внешним магнитным полем, не требуются дополнительные токовые шины с медленно, спадающим с расстоянием (по логарифмическому закону) магнитным полем [1, 2]. Нетрудно убедиться, что для перемагничивания магнитным полем собственного тока обычного, даже сравнительно магнитомягкого, ферромагнитного металла требуется неприемлемая плотность тока j свыше 10^8 А/см². Прогресс в этой области наметился в связи с идеей инъекции спин-поляризованных носителей тока в структурах спинового клапана (ферромагнетик—немагнитный проводник—ферромагнетик) или магнитного туннельного перехода (ферромагнетик—диэлектрик—ферромагнетик) [3, 4]. Эффект переключения ориентации намагниченностей с параллельной на антипараллельную, разделённых немагнитной прослойкой магнитных слоёв и, следовательно, магнетосопротивления такой структуры при изменении направления тока был предсказан в работах [5, 6] и впервые наблюдался авторами работы [7]. В первых экспериментах с металлическими структурами $\text{Co}/\text{Cu}/\text{Co}$ для переключения током намагниченности требовалась слишком высокая плотность тока в структуре, порядка 10^7 А/см². Авторам работы [8] удалось снизить плотность тока переключения в полупроводниковой туннельной структуре $\text{GaMnAs}/\text{InGaAs}/\text{GaMnAs}$ на 2 порядка (до 10^5 А/см²), правда при температурах жидкого гелия. В последнее время появились сообщения о структурах спинового клапана [9] и магнитного туннельного перехода [10] с магнитными обкладками из сплавов Гейслера, в которых уже при комнатной температуре наблюдались гистерезисные зависимости сопротивления от тока, $R(I)$, с плотностью тока переключения, пониженной до 10^6 А/см². В данной статье обращается внимание на физическую некорректность приводимых в статьях [4, 7–10] гистерезисных зависимостей дифференциального сопротивления $R(I)$ от тока в самопереключающихся магнитных структурах. Указано, как должны выглядеть не противоречащая закону сохранения энергии гистерезисная зависимость сопротивления структуры от тока и соответствующая ВАХ.

* demidov@phys.unn.ru

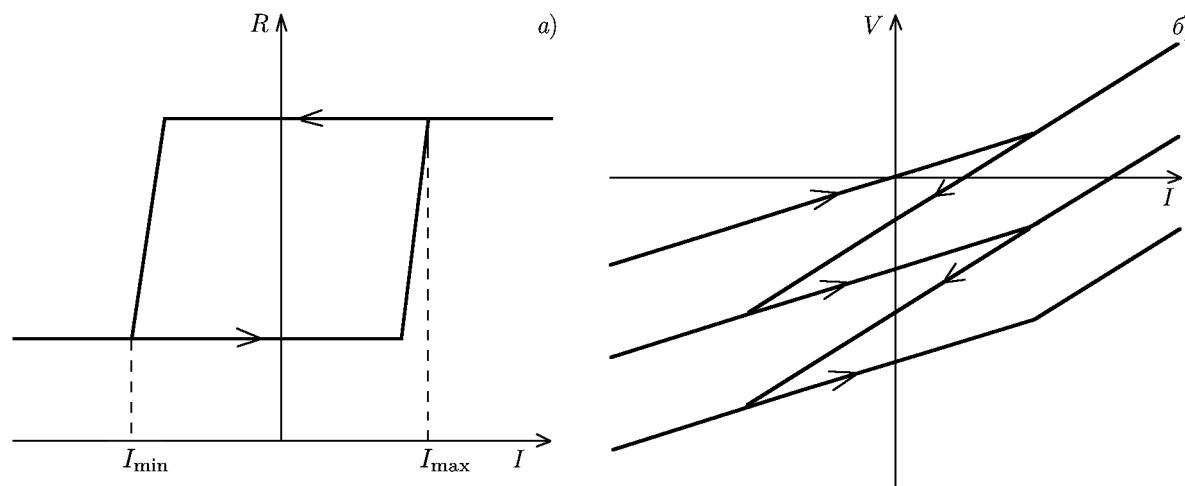


Рис. 1. Схематичный вид токовой зависимости дифференциального сопротивления $R(I)$ самопереключающихся магнитных структур в работах [4, 7–10] (а) и соответствующая расходящаяся ВАХ (б)

В работах [4, 7–10] приводятся зависимости сопротивления структур от тока, $R(I) = f(I)$, вид которых схематично показан на рис. 1а. Эти зависимости с точностью до сдвига по вертикали подобные известной гистерезисной зависимости намагниченности ферромагнетика от напряжённости магнитного поля. Известны различные способы математического описания гистерезиса намагниченности ферромагнетика с параметрическим представлением гармоническими функциями или сложными интегральными соотношениями [11]. В данной статье используется простой и удобный для компьютерного моделирования вариант описания. Гистерезис на рис. 1а смоделирован с помощью дискретной функции, определённой на оси I с шагом ΔI на пути $I_{\min} \rightarrow I_{\max} \rightarrow I_{\min}$:

$$f(I) = \frac{f_0}{1 + \exp\{\alpha[-\beta \text{sign}(\Delta I) - I]\}} + \varphi, \quad (1)$$

где величины $f_0 = 1$ и $\varphi = 1$ определяют степень гистерезиса, $\alpha = 10$ — резкость гистерезиса, $\beta = 10$ — «коэрцитивная сила», определяющая ширину петли гистерезиса. Соответствующая этой зависимости ВАХ, получающаяся интегрированием $R(I)$ с повторением циклов ($I_{\min} \rightarrow I_{\max} \rightarrow \rightarrow I_{\min} \rightarrow \dots$) последовательного прохождения петли гистерезиса, является, как видно из рис. 1б, расходящейся и противоречащей закону сохранения энергии. Правильная резистивная гистерезисная зависимость $R(I)$ самопереключающейся структуры должна содержать компенсирующие друг друга при интегрировании пётли с противоположными направлениями прохождения, как это схематично показано на рис. 2а. Такая зависимость $R(I)$ моделируется линейной комбинацией функции (1) и её дискретной первой производной $\Delta f(I)/\Delta I$:

$$R(I) = f(I) - \frac{\Delta f(I)}{\Delta I} \gamma, \quad (2)$$

где обеспечивающий компенсацию петель гистерезиса множитель γ имеет вид

$$\gamma = (\beta + |\Delta I/2|)\text{sign}(\Delta I). \quad (3)$$

Соответствующая рис. 2а ВАХ с гистерезисом показана на рис. 2б и определяется численным

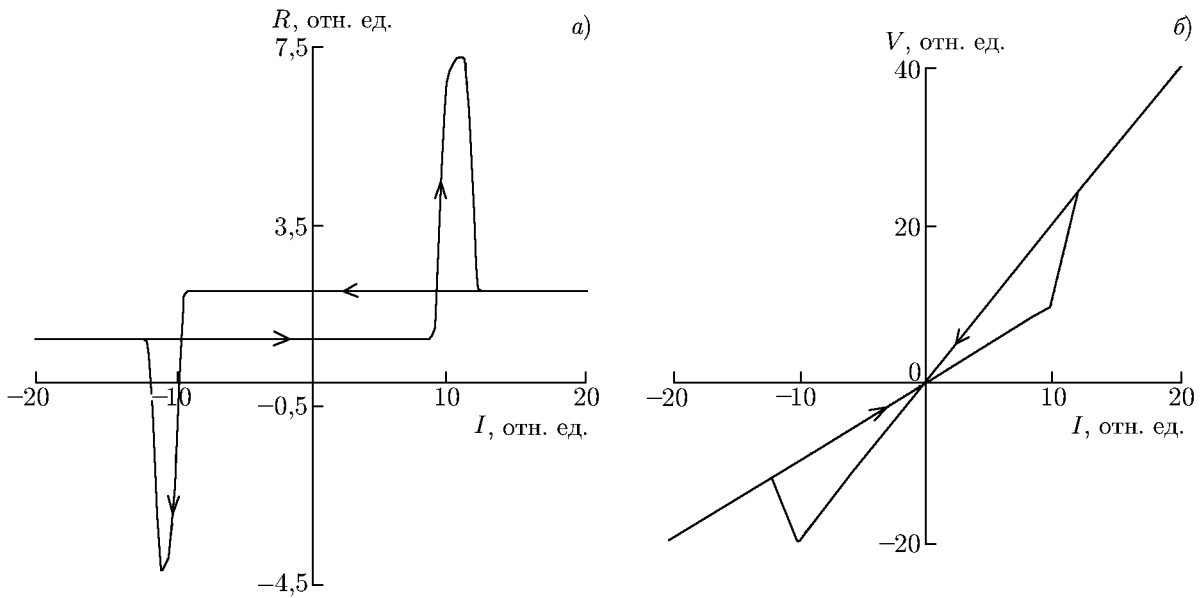


Рис. 2. Схематичный вид правильной зависимости $R(I)$ самопереключающейся структуры с параметрами $f_0 = 1, \varphi = 1, \alpha = 10, \beta = 10$ (а) и соответствующей ВАХ с гистерезисом (б)

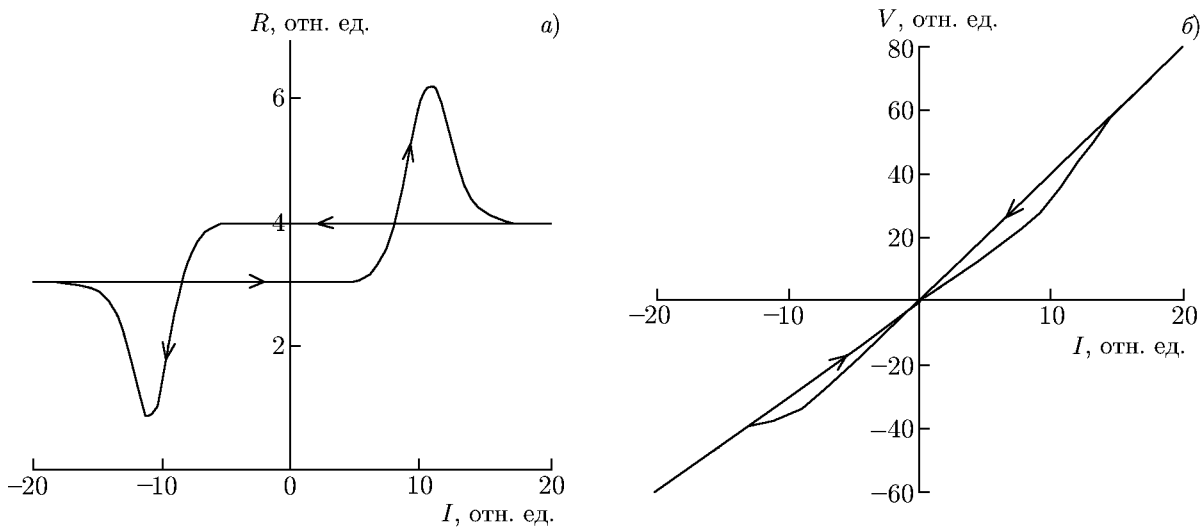


Рис. 3. Схематичный вид правильной зависимости $R(I)$ самопереключающейся структуры без участка с отрицательным дифференциальным сопротивлением на ВАХ с параметрами $f_0 = 1, \varphi = 3, \alpha = 1, \beta = 10$ (а) и соответствующей ВАХ с гистерезисом (б)

циклическим ($I_{\min} \rightarrow I_{\max} \rightarrow I_{\min}$) интегрированием в границах $I_{\max} = -I_{\min} = 20$:

$$V(I) = \sum_{I_{\min}}^I R(I) \Delta I + C, \tag{4}$$

где $I_{\min} < 0$, величина $C = (I_{\min} - |\Delta I|)\varphi$ обеспечивает $V = 0$ при $I = 0$. Важно отметить, что резистивные структуры с самопереключением, кроме нелинейности и гистерезиса, обязательно

должны иметь разный наклон участков слева и справа вне петли гистерезиса, как это видно на рис. 2б.

Вероятно, при измерениях авторами работ [4, 7–10] электротранспортных характеристик слоистых структур применялась инерционная аппаратура, сглаживающая или не позволяющая обрабатывать резкие всплески функции $R(I)$ в районе переключения взаимной ориентации намагниченности магнитных слоёв. Поэтому, чтобы избежать аппаратных искажений при использовании прецизионной инерционной измерительной техники, целесообразно снимать непосредственно ВАХ, которые затем численно дифференцировать для определения перепада дифференциального сопротивления при прямом и обратном их прохождении.

Примечательно, что зависимость $R(I)$ на рис. 2а и соответствующая ей ВАХ на рис. 2б содержат участок с отрицательным дифференциальным сопротивлением. Это означает возможность построения на этом элементе усилителя или генератора электромагнитных колебаний. При определённом соотношении параметров возможен вариант без участка с отрицательным сопротивлением $R(I)$, как показано на рис. 3. Соответствующий набор параметров указан в подписи к этому рисунку. Зависимости $I(V)$ и $G(V)$, где G — проводимость, имеют вид, аналогичный зависимостям $V(I)$ и $R(I)$ соответственно.

Результаты этого рассмотрения подтверждаются проведёнными автором настоящей статьи измерениями ВАХ магнитных туннельных переходов, полученных магнетронным осаждением магнитных и немагнитных слоёв. На рис. 4 приведена гистерезисная зависимость $I(V)$ при комнатной температуре для слоистой магнитной туннельной структуры Pt/Co₂MnSi/MgO/Co₂MnSi/Si с магнитными обкладками из ферромагнитного сплава Гейслера Co₂MnSi и диэлектрической прослойкой MgO. Детали технологии изготовления и особенности структуры будут описаны в другой статье. Как видно, зависимость $I(V)$ хорошо согласуется с модельной гистерезисной кривой на рис. 2б. При самопереключении имеет место двукратное изменение дифференциальной проводимости при малой плотности тока порядка 10^3 А/см².

В заключение следует отметить, что изложенные качественные соображения могут быть применимы и к самопереключающимся структурам, работа которых основана на других немагнитных физических явлениях, например атомном токовом переносе в мемристорах [12].

Автор благодарен Ю. А. Дудину и В. П. Лесникову за изготовление туннельных переходов и Е. А. Европейцеву и С. Н. Гусеву за помощь в проведении измерений. Работа выполнена при поддержке РФФИ (проект 11-02-00855а) и Минобрнауки РФ (аналитическая ведомственная целевая программа «Развитие научного потенциала высшей школы», проект 2.1.1/12029; программа «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России»; проект 02.740.11.0672; проект 02.В.49.21.0003).

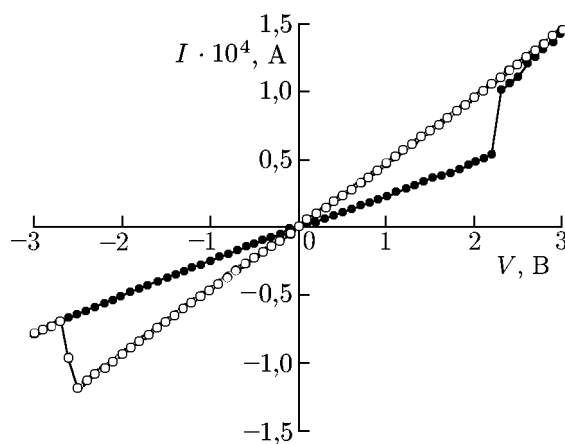


Рис. 4. Экспериментальная ВАХ магнитной туннельной структуры Pt/Co₂MnSi/MgO/Co₂MnSi/Si при 293 К. Участок петли гистерезиса около начала координат с меньшим наклоном соответствует прямому ходу при циклических измерениях

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Аплеснин С. С. Основы спинтроники. СПб: Лань, 2010. 288 с.
2. Данилов Ю. А., Демидов Е. С., Ежевский А. А. Основы спинтроники. Нижний Новгород: ННГУ, 2009. 173 с.
3. Грюнберг П. А. // Успехи физ. наук. 2008. Т. 178. С. 1349.
4. Ферт А. // Успехи физ. наук. 2008. Т. 178. С. 1337.
5. Berger L. // Phys. Rev. B. 1996. V. 54. P. 9353.
6. Slonczewski J. C. // J. Magnetism Magnetic Materials. 1996. V. 159. P. L1.
7. Katine J. A., Albert F. J., Buhrman R. A., et al. // Phys. Rev. Lett. 2000. V. 84. P. 3149.
8. Elsen M., Boule O., George J.-M., et al. // Phys. Rev. B. 2006. V. 73. Art. no. 035303-4.
9. Sukegawa H., Kasai S., Furubayashi T., et al. // Appl. Phys. Lett. 2010. V. 96. Art. no. 042508-1-3.
10. Yao X., Meng H., Zhang Y., Wang J.-P. // J. Appl. Phys. 2008. V. 103. Art. no. 07A717-1-3.
11. Lapshin R. V. // Rev. Sci. Instrum. 1995. V. 66. P. 4718.
12. Strukov D. B., Snider G. S., Stewart D. R., Williams R. S. // Nature. 2008. V. 453. P. 80.

Поступила в редакцию 21 апреля 2015 г.; принята в печать 15 октября 2015 г.

**CORRECT DETERMINATION OF HYSTERESIS OF NONLINEAR
CURRENT-VOLTAGE CHARACTERISTICS OF SPIN VALVES, MAGNETIC
TUNNEL JUNCTIONS, OR MEMRISTORS**

E. S. Demidov

As of now, significant progress has been made in synthesis of spin valve structures, which are switched by the intrinsic current, and magnetic tunnel junctions with hysteresis dependencies of resistivity on the current. These structures are of interest for creation of small-size electronic memory. However, hysteresis of resistivity, which is usually presented in publications, does not correspond to physical principles. In this paper, we show how the hysteresis dependence of the resistivity on the current, or the conductivity on the voltage, which does not contradict the energy preservation law, as well as the corresponding voltage—current characteristic, should look like. As an example, we present the experimental voltage—current characteristic of the magnetic tunnel junction $\text{Co}_2\text{MnSi}/\text{MgO}/\text{Co}_2\text{MnSi}$, which agrees with the model hysteresis dependencies.