

НЕЛИНЕЙНЫЙ ТОКОПЕРЕНОС В НАНОСТРУКТУРЕ ФЕРРОМАГНЕТИК / ШИРОКОЗОННЫЙ ПОЛУПРОВОДНИК / ФЕРРОМАГНЕТИК

Т.Н. Сидорова, А.Л. Данилюк

Учреждение образования «Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники», Минск, Республика Беларусь

Аннотация. В данной работе разработана модель токопереноса в туннельных наноструктурах ферромагнетик/ широкозонный полупроводник/ ферромагнетик с использованием двухзонной модели Франца-Кейна и метода фазовых функций. Рассчитаны вольт-амперная характеристика и туннельное магнитосопротивление (ТМС) такой наноструктуры с учетом возникновения дополнительного канала токопереноса через валентную зону широкозонного полупроводника. Показано, что если уровень Ферми E_F лежит ниже середины запрещенной зоны широкозонного полупроводника, в зависимости туннельного тока от внешнего смещения возникают участки отрицательного дифференциального сопротивления (ОДС). Установлено, что ТМС основного канала монотонно спадает, а ТМС дополнительного канала осциллирует с ростом внешнего смещения, коррелируя с ВАХ. Наличие эффекта ОДС в рассматриваемых наноструктурах позволит существенно увеличить значение ТМС, что важно для практических применений.

Ключевые слова: ферромагнетик, широкозонный полупроводник, спин-зависимый токоперенос, вольт-амперная характеристика, туннельное магнитосопротивление, двухзонная модель, метод фазовых функций, валентная зона, ширина запрещенной зоны, отрицательное дифференциальное сопротивление

NONLINEAR TRANSPORT IN THE FERROMAGNETIC/ WIDE-GAP SEMICONDUCTOR/ FERROMAGNETIC NANOSTRUCTURE

T.N. Sidorova, A.L. Danilyuk

*Belorussian State University of Informatics and Radioelectronics
Minsk, Republic of Belarus*

Abstract. Model of the transport in the tunneling nanostructures ferromagnetic/ wide-gap semiconductor / ferromagnetic based on two-band Franz-Kein Model and phase function method was developed. Current-Voltage characteristics and tunneling magnetoresistance (TMR) considering the additional transport channel through the valence band of the wide-gap semiconductor were calculated. Shown, if Fermi level E_F is lower than the middle of the band gap of the wide-band semiconductor, depending on the external bias and tunneling current regions of the negative differential resistance (NDR) appear. It is found out, TMR of the main channel goes down monotonously, at the same time TMR of the additional channel oscillates with the external bias growth, correlating with the Current-Voltage characteristics. Availability of the NDR leads to the TMR increasing, which is important for the practical application

Keywords: ferromagnetic, wide-gap semiconductor, spin-dependent transport, current-voltage characteristic, tunnel magnetoresistance, two-band model, phase function model, valence band, band-gap thickness, negative differential resistance.

Введение

В настоящее время интенсивно исследуются механизмы токопереноса в наноструктурах ферромагнетик/ широкозонный полупроводник / ферромагнетик (ФМ/ШЗП/ФМ) для создания устройств обработки информации, в том числе с использованием спина. Раннее расчет туннельного магнитосопротивления (ТМС) в таких структурах проводился только в рамках однозонной модели.

Модель

В данной работе разработана модель токопереноса в туннельных наноструктурах ферромагнетик/ широкозонный полупроводник / ферромагнетик с использованием двухзонной модели [1] и метода фазовых функций [2]. В связи с тем, что валентная зона может давать существенный вклад в токоперенос (наличие дополнительного канала токопереноса), рассмотрим двухзонную модель. Особенностью данной модели является учет валентной зоны в полупроводниковом слое. Туннельный барьер представляет собой не потенциальную ступеньку, а запрещенную полосу энергий, верхней границей которой является дно зоны проводимости E_C , а нижней – потолок валентной зоны E_V .

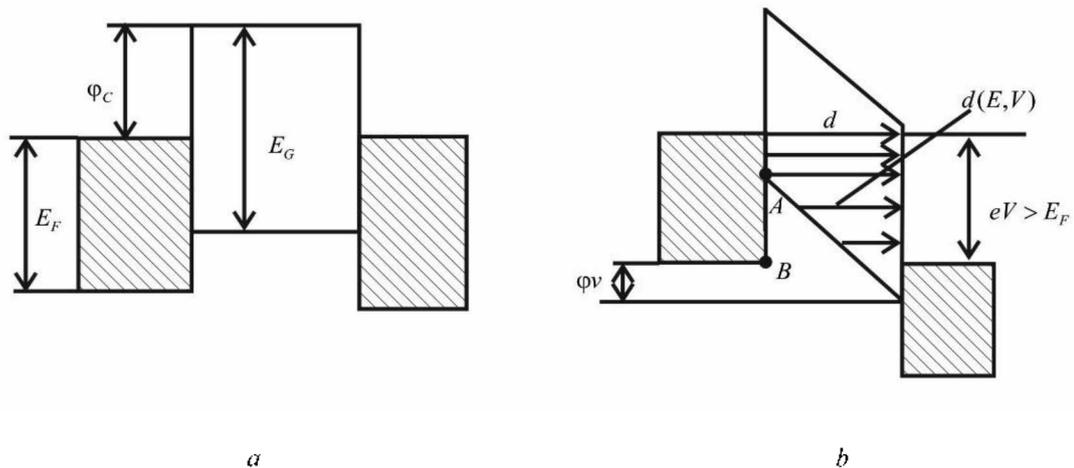


Рис. 1. Потенциальная диаграмма структуры ФМ/ШЗП/ФМ в отсутствии внешнего смещения (а) и при его наличии (б)

Fig. 1. Potential structure diagram of the structure ferromagnetic/Wide-gap semiconductor/ ferromagnetic without external bias (a) and with external bias (b)

Внутри этой полосы волновой вектор электрона является мнимой величиной, которая в соответствии с законом Франца-Кейна определяется соотношением [1]

$$k_z^2 = \frac{2m_i}{\hbar^2} \frac{(E - E_C)(E - E_V)}{E_G} = k_{||}^2 \quad (1)$$

Здесь k_z – перпендикулярная, а k – параллельная барьеру составляющие волнового вектора электрона, E – полная энергия электрона, m_i – его эффективная масса, E_G – ширина запрещенной зоны полупроводника.

Величину тока определяем с учетом поперечной составляющей энергии туннелирующего электрона на основе транспортного уравнения [1]:

$$I(V) = \frac{4\pi m e}{\hbar^2} \int_0^\infty dE (f_L(E) - f_R(E)) \int_0^{(m/m_i)E} dE_{||} T(E, E_{||}, V), \quad (2)$$

где $E_{||}$ – компонента электронной энергии E , параллельная плоскости туннельного барьера, m – эффективная масса электрона в электроде (ФМ), а $f_L(E)$ и $f_R(E)$ – функции распределения Ферми- Дирака эмиттера и коллектора, $T(E, E_{||}, V)$ – коэффициент туннельного прохождения.

Для нахождения коэффициента туннельного прохождения нами разработана модель на основе метода фазовых функций [2,3]. Модель учитывает параметры барьера, потенциал сил изображения, позволяет включать потенциальный рельеф границ раздела и в объеме полупроводника. Коэффициент туннельного прохождения через барьер описывается уравнением:

$$T_{\sigma} = \exp \left[\frac{1}{k_{\sigma}} \int_a^b U_{\text{eff}}(z) [b_{\sigma}(z) \cos(2k_{\sigma}z) - a_{\sigma}(z) \sin(2k_{\sigma}z)] dz \right], \quad (3)$$

где эффективный потенциал $U_{\text{eff}} = (2m/\hbar^2)(U_0 + k^2 - qV(z) - q\phi(z) \pm V_{sc}(z))$, k_{σ} – волновой вектор, σ – индекс спиновой компоненты, \hbar – постоянная Планка, U_0 – максимальная величина потенциального барьера для электронов проводимости, $\phi(z)$ – потенциал сил изображения; $V_{sc}(z)$ – потенциал рассеяния, учитывающий неоднородность потенциального рельефа, $V(z)$ – электростатический потенциал, q – элементарный заряд.

Результаты

Была рассчитана вольт-амперная характеристика (ВАХ) наноструктуры ФМ/ШЗП/ФМ с учетом возникновения дополнительного канала токопереноса через валентную зону широкозонного полупроводника.

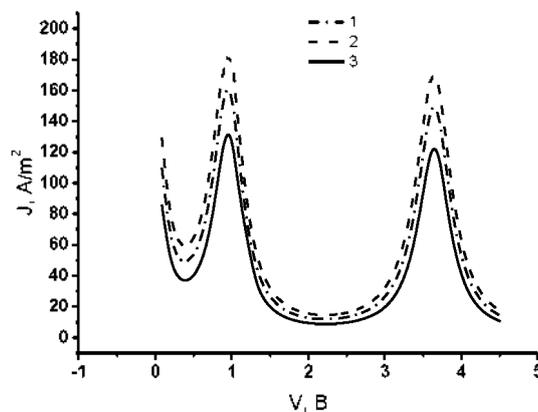


Рис. 2. Вольт-амперная характеристика в зависимости от значения ширины запрещенной зоны полупроводника. где 1 – $E_G=8$ эВ, 2 – $E_G=8.5$ эВ, 3 – $E_G=7.5$ эВ

Fig. 2. Current-Voltage characteristics depending from the band gap thickness. where 1 – $E_G=8$ eV, 2 – $E_G=8.5$ eV, 3 – $E_G=7.5$ eV

При увеличении значения ширины запрещенной зоны полупроводника с 7,5 эВ до 8,5 эВ (рис. 2) значения плотности тока в пиках меняются с 125 A/m^2 до 180 A/m^2 и с 120 A/m^2 до 175 A/m^2 . Поведение ВАХ при этом не меняется. Максимальные пики приходятся на значения 1,0 В и 3,9 В соответственно. При изменении толщины полупроводника значения экстремумов ВАХ не меняются, однако поведение ВАХ претерпевает определенные изменения. При увеличении толщины с 0,5 нм до 2 нм пик смещается в сторону меньшего напряжения. Например, при толщине 0,5 нм пик приходится на 0,5 В, однако при $d = 2$ нм пик становится уже.

В вольт-амперных характеристиках наблюдаются области отрицательного дифференциального сопротивления (ОДС). Все кривые имеют резко выраженный максимум, после которого туннельный ток уменьшается. Первый пик можно связать с изменением эффективной толщины ШП, рис. 1б, а второй – с положением уровня Ферми. Если уровень Ферми E_F исследуемой структуры лежит ниже середины запрещенной зоны ШП ($qV > E_F$), то в зависимости туннельного тока от напряжения смещения возникает ОДС.

Таким образом, появление ОДС в вольт-амперной характеристике есть своеобразное проявление зонного эффекта, связанного с изменением положения уровня Ферми эмиттера относительно середины запрещенной зоны ШП, а также уменьшением эффективной толщины $d(E, V)$ ШП, рис. 1, б.

Было также рассчитано туннельное магнитосопротивление (ТМС) наноструктуры ФМ/ШЗП/ФМ учитывая возникновение дополнительного канала токопереноса через валентную зону широкозонного полупроводника. ТМС основного канала нелинейно изменяется с 0,15 до 0,03 с ростом внешнего смещения и почти не зависит от толщины до $V = 2,5$ В (рис. 3, а). При $V > 2,5$ В, ТМС расщепляется в зависимости от толщины: наибольшее значение наблюдается при $d = 2,0$ нм, а наименьшее при $d = 1,5$ нм. Наблюдается локальный минимум ($V = 3,0$ В) и локальный максимум ($V = 3,5 - 3,6$ В). Эти экстремумы коррелируют с экстремумами ВАХ, рис. 2. ТМС дополнительного канала с ростом внешнего смещения осциллирует при $d = 2,0$ нм, а при $d = 1,5$ и $2,5$ нм практически не изменяется в области 1–3 В (рис. 3, б).

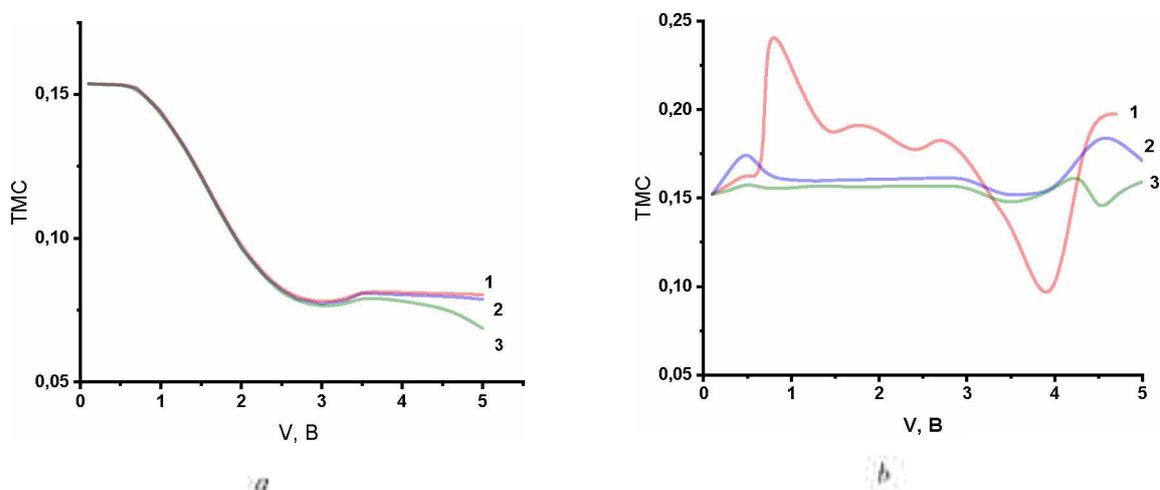


Рис. 3. Туннельное магнитосопротивление в зависимости от толщины широкозонного полупроводника в случае, когда E_F расположен выше середины запрещенной зоны, где 1 – $d = 2$ нм, 2 – $d = 2,5$ нм, 3 – $d = 1,5$ нм : а – ТМС основного канала, б – ТМС дополнительного канала
Fig. 3. Tunneling magnetoresistance depending from the wide band semiconductor thickness when E_F is higher the middle of the band gap, where 1 – $d = 2.0$ nm, 2 – $d = 2.5$ nm, 3 – $d = 1.5$ nm : а – TMR of the main channel, б – TMR of the additional channel

Для средней толщины в 2,0 нм наблюдается 2 экстремума на графике ТМС дополнительного канала при напряжении около 1 В (ТМС=0,25) и вблизи 4,0 В (ТМС = 0,1). Эти экстремумы могут быть объяснены взаимозависимостью между наибольшим и наименьшим значением на ВАХ в области ОДС именно при этой толщине. Наличие эффекта ОДС в рассматриваемых наноструктурах позволит существенно увеличить значение ТМС, что важно для практических применений.

Заключение

Согласно проведенным расчетам, ВАХ и туннельное магнитосопротивление наноструктуры ФМ/ШЗП/ФМ являются существенно нелинейными. Такое поведение обуславливается смещением осцилляций коэффициентов туннельного прохождения в область энергии Ферми и уменьшением эффективной толщины ШЗП при росте внешнего смещения. При росте внешнего смещения осцилляции ВАХ и ТМС претерпевают фазовые и амплитудные изменения, обусловленные изменением, как высоты, так и толщины потенциального барьера. Для ШЗП с толщиной равной 1,5 нм и 2,5 нм ТМС для дополнительного канала практически не изменяется. Для толщины 2 нм наблюдается 2 экстремума в зависимости ТМС для дополнительного канала при напряжении смещения около 1 В (ТМС=0,25) и 4 В (ТМС =0,1). Эти экстремумы могут быть объяснены наличием корреляции ТМС с ВАХ.

Список использованных источников

1. K.H. Gundlach. Theory of metal-insulator-metal tunneling for a simple two-band model. J. Appl. Phys. Vol. 44, Iss. 11. P.5005-5010 (1973).
2. Babikov V.V (1976) Phase-function method in quantum mechanics. Moscow, Nauka (in Russian).
3. T.N. Sidorova, Alexander L. Danilyuk (2014). Negative differential resistance in ferromagnet/wide-gap semiconductor/ferromagnet nanostructure. Materials Physics and Mechanics, vol. 20. Iss.2. P.106-110

References

1. K.H. Gundlach. Theory of metal-insulator-metal tunneling for a simple two-band model. J. Appl. Phys. Vol. 44, Iss. 11. P.5005-5010 (1973).
2. Babikov V.V (1976) Phase-function method in quantum mechanics. Moscow, Nauka (in Russian).
3. T.N. Sidorova, Alexander L. Danilyuk (2014). Negative differential resistance in ferromagnet/wide-gap semiconductor/ferromagnet nanostructure. Materials Physics and Mechanics, vol. 20. Iss.2. P.106-110

Сведения об авторах

Сидорова Т.Н., младший научный сотрудник, учреждение образования «Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники». sharsu_antea@bk.ru.
Данилюк А.Л., кандидат физико-математических наук, доцент, ведущий научный сотрудник, учреждение образования «Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники». danilyuk@bsuir.by.

Information about the authors

Sidorova T.N., junior researcher at the Center for Nanoelectronics and New Materials of R&D Department of the Educational Institution "Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics", sharsu_antea@bk.ru.
Danilyuk A.L., PhD in Physics and Mathematics, Associate Professor, Leading Researcher, Educational Institution "Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics". danilyuk@bsuir.by.