

## Магнитоимпеданс наноструктуры Cu—Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>—CeO<sub>2</sub>—Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>—Cu

А. Ф. Андреева, А. М. Касумов, В. З. Хриновский,  
А. А. Микитченко

*Рассмотрена работа наноразмерной структуры Cu—Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>—CeO<sub>2</sub>—Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>—Cu на переменном токе. В зависимости от условий наблюдается как положительный, так и отрицательный знак туннельного магнитоимпеданса (ТМИ). Наибольшее значение ТМИ наноструктуры составило 734%, ему соответствует наибольшая поляризация спинов электронов в слоях Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>, равная 93,8%.*

**Ключевые слова:** туннельный магнитоимпеданс, спиновая поляризация, магнетит Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>, CeO<sub>2</sub>.

Устройства, использующие в работе эффект туннельного магнитоимпеданса (ТМИ), имеют широкие перспективы для применения в спинтронике [1]. Основной рабочий узел таких устройств состоит из двух слоёв ферромагнетика, разделённых прослойкой немагнитного материала. Подбор свойств данных слоёв и условий их работы позволяет достигать значительной величины ТМИ, то есть высокой эффективности эксплуатации устройства. Вызывает интерес использование в качестве ферромагнетика магнетита Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>, а в качестве материала прослойки — оксидов редкоземельных металлов. Магнетит относится к полуметаллам, в которых, согласно теоретическим расчётам, может быть получена поляризация спинов электронов на уровне Ферми 100%. При этом в устройстве может быть достигнута значительная величина ТМИ [2]. Оксиды же содержат атомы редкоземельных металлов, обладающих отличным от нуля магнитным моментом, который, предположительно, может влиять на спинзависимый транспорт поляризованных электронов между слоями ферромагнетика. Действительно, для наноразмерной структуры, содержащей слои Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> и Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, получена большая величина туннельного магнитосопротивления (1085%) при работе на постоянном токе и туннельного магнитоимпеданса (708%) в режиме переменного тока [3]. В настоящей работе рассмотрены свойства наноструктуры, содержащей слои Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> и прослойку из оксида другого редкоземельного металла — CeO<sub>2</sub>, при работе на переменном токе. Проведено сравнение наноструктур с туннельными барьерами на основе CeO<sub>2</sub> и Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub>.

Наноструктура Cu—Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>—CeO<sub>2</sub>—Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>—Cu представляла собой пакет из последовательно нанесённых на полированную стеклянную подложку слоёв Cu, Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> и CeO<sub>2</sub>. Пленки осаждали методом электронно-лучевого испарения металлов. Использованы следующие оптимальные условия роста слоёв: Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> — парциальное давление кислорода в камере — (2—5)·10<sup>-3</sup> Па, скорость роста слоёв — 5—50 нм/мин, температура подложки — 25 °С; CeO<sub>2</sub> — соответственно 1·10<sup>-2</sup> Па, 7—10 нм/мин, 25 °С;

Cu —  $5 \cdot 10^{-4}$  Па, 25—50 нм/мин, 25 °С. Толщину слоёв варьировали в пределах:  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  — 100—200 нм,  $\text{CeO}_2$  — 25—30 нм, Cu — 150—200 нм. Электронографический анализ показал, что выращенные в данных условиях пленки  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  и Cu имеют поликристаллическую структуру, а  $\text{CeO}_2$  — аморфную.

Магнитное поле, управляющее намагниченностью слоёв  $\text{Fe}_3\text{O}_4$ , создавалось током, который протекал вдоль Cu-слоёв. Переменный ток вызывал периодическую смену направления намагничивания в слоях  $\text{Fe}_3\text{O}_4$ . Управляя сдвигом фазы токов, протекающих по каждому из Cu-электродов, можно создать параллельную либо антипараллельную намагниченность в двух соседних слоях магнетита. Проводя при этом одновременное измерение мостом переменного тока активной и ёмкостной составляющих импеданса наноструктуры, удавалось определить величину туннельного магнитоимпеданса:  $\text{ТМИ} = \frac{Z_{\uparrow\downarrow} - Z_{\uparrow\uparrow}}{Z_{\uparrow\downarrow}}$ , где

$Z_{\uparrow\uparrow}$  и  $Z_{\uparrow\downarrow}$  — величина импеданса наноструктуры при соответственно параллельной и антипараллельной намагниченности слоёв  $\text{Fe}_3\text{O}_4$ . Изменяя величину  $I$  и частоту  $f$  тока намагничивания, определяли зависимости ТМИ ( $I, f$ ).

Определение импеданса  $Z$  мостом переменного тока проводили по эквивалентной схеме, в которой наноструктура рассматривалась как параллельно соединенные активное  $R_{\text{акт}}$  и ёмкостное  $R_c$  сопротивления. При этом расчетная формула для импеданса имеет вид  $\frac{1}{Z^2} = \frac{1}{R_{\text{акт}}^2} + \frac{1}{R_c^2}$  [4]. На рис. 1 представлена зависимость активного поперечного сопротивления наноструктуры Cu— $\text{Fe}_3\text{O}_4$ — $\text{CeO}_2$ — $\text{Fe}_3\text{O}_4$ —Cu при параллельной  $R_{\text{акт}}^{\uparrow\uparrow}$  (1) и антипараллельной  $R_{\text{акт}}^{\uparrow\downarrow}$  (2) намагниченности слоёв  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  от частоты  $f$  и

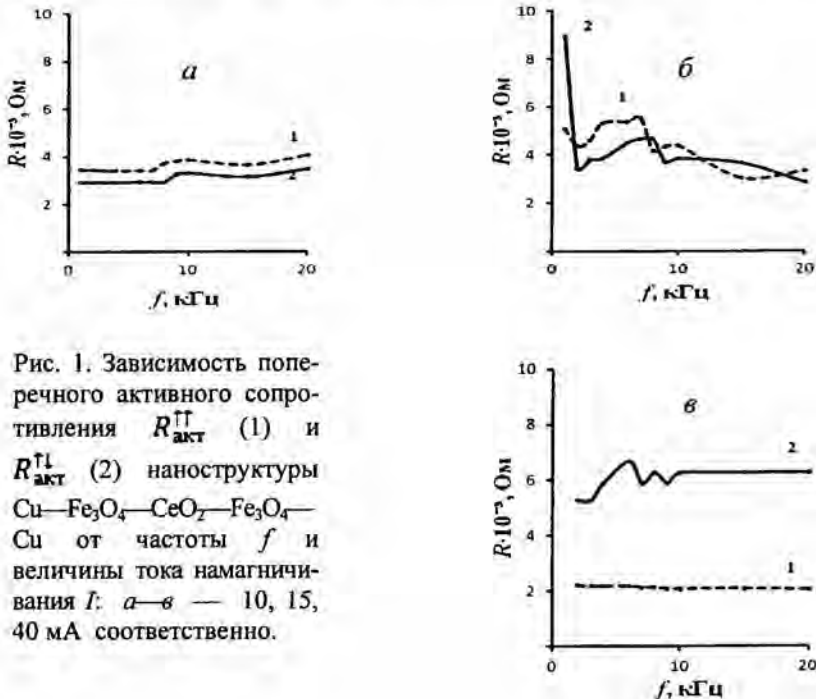


Рис. 1. Зависимость поперечного активного сопротивления  $R_{\text{акт}}^{\uparrow\uparrow}$  (1) и  $R_{\text{акт}}^{\uparrow\downarrow}$  (2) наноструктуры Cu— $\text{Fe}_3\text{O}_4$ — $\text{CeO}_2$ — $\text{Fe}_3\text{O}_4$ —Cu от частоты  $f$  и величины тока намагничивания  $I$ : а—в — 10, 15, 40 мА соответственно.

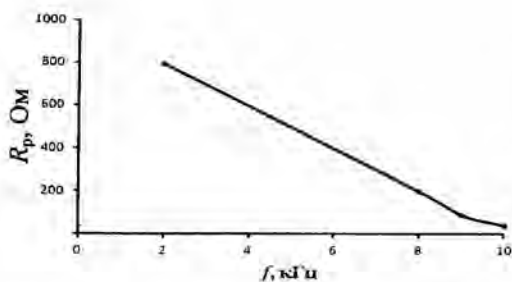


Рис. 2. Зависимость ёмкостного сопротивления наноструктуры  $\text{Cu—Fe}_3\text{O}_4\text{—CeO}_2\text{—Fe}_3\text{O}_4\text{—Cu}$   $R_c \approx R_c^{\uparrow\uparrow} \approx R_c^{\downarrow\downarrow}$  от частоты  $f$  тока намагничивания при  $I = 10$  мА.

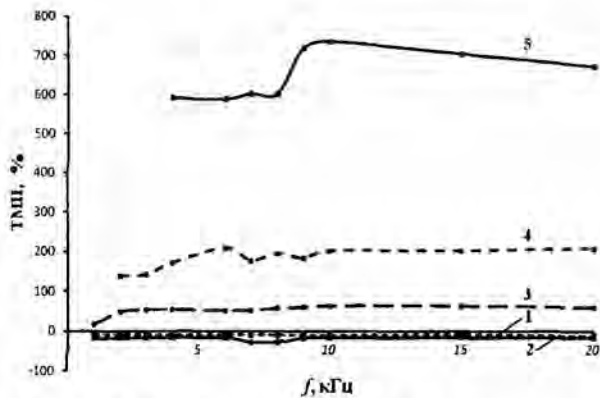
величины тока намагничивания  $I$ . Видно, что с увеличением частоты  $f$  кривые  $R_{\text{акт}}^{\uparrow\uparrow}(f)$  и  $R_{\text{акт}}^{\downarrow\downarrow}(f)$  проходят через ряд экстремумов, величина которых повышается с ростом  $I$ . Их возникновение, очевидно, обусловлено неполной синхронизацией перемагничивания слоёв  $\text{Fe}_3\text{O}_4$ , вызванной неконтролируемым различием в размерах и ориентации поликристаллов в данных пленках. Зависимость  $R_{\text{акт}}^{\uparrow\uparrow}$  и  $R_{\text{акт}}^{\downarrow\downarrow}$  от величины и частоты тока намагничивания, по-видимому, вызвана присутствием в прослойке  $\text{CeO}_2$  ориентированных полей данного тока парамагнитных ионов церия, участвующих в спинзависимом переносе поляризованных электронов. При различных  $I$  и  $f$  тока намагничивания имеют место случаи как преобладания  $R_{\text{акт}}^{\uparrow\uparrow}$  над  $R_{\text{акт}}^{\downarrow\downarrow}$ , так и обратного соотношения этих величин.

На рис. 2 показана зависимость от частоты тока намагничивания ёмкостного сопротивления наноструктуры  $\text{Cu—Fe}_3\text{O}_4\text{—CeO}_2\text{—Fe}_3\text{O}_4\text{—Cu}$  при параллельной  $R_c^{\uparrow\uparrow}$  и антипараллельной  $R_c^{\downarrow\downarrow}$  намагнитченности слоёв  $\text{Fe}_3\text{O}_4$ . Ток намагничивания равен 10 мА. Видно, что  $R_c^{\uparrow\uparrow} = R_c^{\downarrow\downarrow}$ , то есть ёмкостное сопротивление наноструктуры не зависит от направления намагнитченности слоёв  $\text{Fe}_3\text{O}_4$ . Зависимость  $R_c(f)$  имеет гиперболический характер и отражает частотную зависимость вида  $R_c = \frac{1}{4\pi f C}$  [4].

Из сравнения рис. 1 и 2 следует, что  $R_c \gg R_{\text{акт}}^{\uparrow\uparrow}, R_{\text{акт}}^{\downarrow\downarrow}$ . Поэтому импеданс  $Z$  наноструктуры  $\text{Cu—Fe}_3\text{O}_4\text{—CeO}_2\text{—Fe}_3\text{O}_4\text{—Cu}$ , рассматриваемой по параллельной эквивалентной схеме, определяется в основном его активной составляющей:  $Z^{\uparrow\uparrow} = R_{\text{акт}}^{\uparrow\uparrow}$  и  $Z^{\downarrow\downarrow} = R_{\text{акт}}^{\downarrow\downarrow}$ . Отсюда следует, что туннельный магнитоимпеданс ТМИ равен туннельному магнитосопротивлению:  $\text{ТМИ} = \text{TMR} = \frac{R^{\downarrow\downarrow} - R^{\uparrow\uparrow}}{R^{\downarrow\downarrow}}$ .

На рис. 3 приведена зависимость ТМИ наноструктуры  $\text{Cu—Fe}_3\text{O}_4\text{—CeO}_2\text{—Fe}_3\text{O}_4\text{—Cu}$  от частоты тока намагничивания при его величине  $I = 10, 20, 40$  и  $50$  мА. Наблюдаемые на рисунке особенности частотной зависимости  $\text{ТМИ}(f)$  — наличие экстремумов, рост при увеличении  $I$ , являются следствием аналогичного поведения величин  $R_{\text{акт}}^{\uparrow\uparrow}(f)$  и  $R_{\text{акт}}^{\downarrow\downarrow}(f)$ , входящих в формулу для расчёта ТМИ. Сохраняется и экспоненциальный характер зависимости ТМИ от  $I$ : соотношение  $\text{ТМИ} = \exp(0,09I)$  близко к  $R_{\text{акт}}^{\downarrow\downarrow} \sim \exp(0,07I)$ . На рис. 3 также видно, что ТМИ может иметь как положительный, так и отрицательный знак. Это — результат указанного на рис. 1 изменения соотношения  $R_{\text{акт}}^{\uparrow\uparrow} > R_{\text{акт}}^{\downarrow\downarrow}$  на обратное при величине тока намагничивания  $I = 15$  мА. Изменение знака ТМИ имело место и при высоких частотах (160 кГц).

Рис. 3. Зависимость туннельного магнитоимпеданса ТМИ наноструктуры  $\text{Cu—Fe}_3\text{O}_4\text{—CeO}_2\text{—Fe}_3\text{O}_4\text{—Cu}$  от частоты  $f$  тока намагничивания при  $I = 5$  (1), 10 (2), 20 (3), 40 (4) и 50 мА (5).



В наноструктуре  $\text{Cu—Fe}_3\text{O}_4\text{—CeO}_2\text{—Fe}_3\text{O}_4\text{—Cu}$  наибольшее значение ТМИ = 743% достигнуто при  $I = 50$  мА и  $f = 10$  кГц. В аналогичной наноструктуре, имеющей туннельный барьер на основе  $\text{Y}_2\text{O}_3$  [3], близкое по величине наибольшее ТМИ = 708% получено при меньших значениях тока и частоты:  $I = 10$  мА и  $f = 7$  кГц. Очевидно, что перемагничивание слоёв  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  переменным полем в наноструктуре с  $\text{Y}_2\text{O}_3$  происходит легче, чем с  $\text{CeO}_2$ . Это может быть обусловлено меньшей величиной магнитного момента у ионов  $\text{Y}$  ( $\mu = 0,67$  магнетона Бора) по сравнению с ионами  $\text{Ce}$  ( $\mu = 2,51$  магнетона Бора) [5].

На рис. 4 показана зависимость величины поляризации  $P$  спинов электронов в слоях  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  от частоты тока намагничивания. Поляризация рассчитана по формуле  $\text{TMR} = \frac{P_1 P_2}{1 - P_1 P_2}$  [6], где  $P_1$  и  $P_2$  — величина

поляризации в первом и во втором слоях магнетита, причём принято, что  $P_1 = P_2 = P$ . Особенности поведения функций  $R_{\text{акт}}^{\uparrow\uparrow}(f)$  и  $R_{\text{акт}}^{\downarrow\downarrow}(f)$  — наличие экстремумов, слабая зависимость от частоты в диапазоне 20 Гц — 20 кГц, проявляются и на зависимости  $P(f)$ . Связь  $P$  и  $I$  имеет вид степенной функции,  $P \sim I^{0,5}$ , то есть более слабая, чем экспоненциальная зависимость, наблюдаемая для  $R_{\text{акт}}^{\uparrow\uparrow}$  от  $I$ .

Наибольшая величина поляризации спинов электронов, достигаемая в слоях  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  наноструктуры с туннельным барьером на основе  $\text{CeO}_2$  ( $P = 93,8\%$ ), близка к максимальному значению, полученному с барьером  $\text{Y}_2\text{O}_3$  ( $P = 93,6\%$  [3]). Эти величины получены при тех же значениях  $I$  и  $f$ , при которых достигнуты и наибольшие ТМИ. То есть близкие значения максимальной поляризации возникают в наноструктуре с  $\text{Y}_2\text{O}_3$ -барьером при меньших  $I$  и  $f$  по сравнению с наноструктурой, имеющей  $\text{CeO}_2$ -прослойку. Это

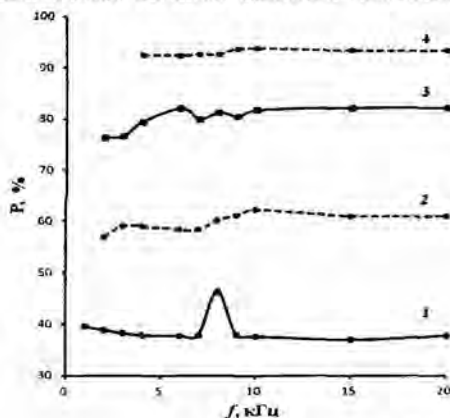


Рис. 4. Зависимость поляризации  $P$  спинов электронов в слоях  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  наноструктуры  $\text{Cu—Fe}_3\text{O}_4\text{—CeO}_2\text{—Fe}_3\text{O}_4\text{—Cu}$  от частоты  $f$  тока намагничивания при  $I = 10$  (1), 20 (2), 40 (3), 50 мА (4).

также может быть обусловлено меньшей величиной магнитного момента у ионов Y по сравнению с ионами Ce, что облегчает перемагничивание слоёв Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> переменным полем.

### Выводы

Установлено, что в наноструктуре Cu—Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>—CeO<sub>2</sub>—Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>—Cu в зависимости от величины и частоты тока намагничивания слоёв Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> наблюдается как положительный, так и отрицательный знак туннельного магнитоимпеданса. В диапазоне 20 Гц—20 кГц зависимость ТМИ и R от частоты слабая. Зависимость от величины тока намагничивания имеет вид: ТМИ ~ exp 0,1I, R ~ I<sup>0,5</sup>. Наибольшее значение ТМИ = 734% и R = 93,8% получены при I = 50 мА и f = 10 кГц.

Сравнение наноструктур с туннельными барьерами на основе CeO<sub>2</sub> и Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub> позволяет сделать предположение о влиянии величины магнитного момента ионов Ce и Y на спинзависимый перенос поляризованных электронов между слоями Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>.

1. *Kuo K. M.* Influence of frequency and DC bias on magneto-impedance behaviors in double-MgO magnetic tunnel junctions / [K. M. Kuo, C. J. Lina, G. Cherna et al.] // Solid State Comp. — 2010. — 150, issue 37—38. — P. 1856—1859.
2. *Teresa J. M. De.* Magnetotransport properties of Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> thin films for applications in spin electronics / [J. M. De Teresa, A. Fernandez-Pacheco, L. Morellon et al.] // Microelectronic Engineering. — 2007. — 84. — P. 1660—1664.
3. *Андреева А. Ф.* Высокое значение туннельного магнитоимпеданса 708%, полученное в наноструктуре Cu—Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>—Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub>—Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>—Cu / [А. Ф. Андреева, А. М. Касумов, В. З. Хриновский, В. М. Караваева] // Тр. 3-й Междунар. конф. HighMatTech, 3—7 окт. 2011 г., Киев, Украина. — 291 с.
4. *Яворский Б. М.* Справочник по физике / Б. М. Яворский, А. А. Детлаф. — М.: Наука, 1977. — 942 с.
5. *Самсонов Г. В.* Физико-химические свойства элементов. — К.: Наук. думка, 1965. — 807 с.
6. *Teresa J. M. De.* Magnetoresistance phenomena in magnetic materials and devices. [esm.neel.cnrs.fr/2005-contanta/abs/deteresa-abs.pdf](http://esm.neel.cnrs.fr/2005-contanta/abs/deteresa-abs.pdf)

### Магнітоімпеданс наноструктури Cu—Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>—CeO<sub>2</sub>—Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>—Cu

А. Ф. Андреева, А. М. Касумов, В. З. Хриновский, А. А. Микитченко

*При роботі на змінному струмі у наноструктурі Cu—Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>—CeO<sub>2</sub>—Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>—Cu отримано найбільше значення тунельного магнітоімпедансу, яке дорівнює 734%, та відповідна йому найбільша величина поляризації спінів електронів у шарах Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> 93,8%. Проведено порівняння наноструктур з тунельним бар'єром на основі CeO<sub>2</sub> та Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub>.*

*Ключові слова:* тунельний магнітоімпеданс, спінова поляризація, магнетит Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>, CeO<sub>2</sub>.

### Magnetoimpedance of nanostructure Cu—Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>—CeO<sub>2</sub>—Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>—Cu

A. F. Andreeva, A. M. Kasumov, V. Z. Khrinovsky, A. A. Mikitchenko

*The work of nanoscale structure Cu—Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>—CeO<sub>2</sub>—Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>—Cu on alternating current was studied. A positive and negative sign of tunneling magnetoimpedance (TMI) at different conditions were observed. The greatest magnitude of TMI = 734% corresponded to the largest spin electron polarization in the Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> layers, which was equal to 93,8%.*

*Keywords:* tunneling magnetoimpedance, spin polarization, magnetite Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>, CeO<sub>2</sub>.