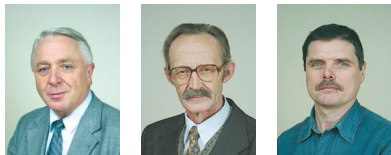


## Металлические сверхрешетки с уникальными магнитотранспортными свойствами

В.В. Устинов, Л.Н. Ромашев, М.А. Миляев



**Впервые синтезированы и исследованы сверхрешетки Fe/Cr с дискретным гигантским магниторезистивным эффектом и эпитаксиальные кластерно-слоистые наноструктуры Fe/Cr с кластерными слоями Fe, обладающие суперпарамагнетизмом, Кондо-подобным поведением электросопротивления и большим магнитосопротивлением в области азотных и гелиевых температур. Определена физическая природа уникальных свойств этих мультислойных наноструктур, представляющих как научный, так и практический интерес.**

Разработана технология получения на отечественной установке молекулярно-лучевой эпитаксии "Катунь-С" металлических наногетероструктур и сверхрешеток, состоящих из чередующихся атомных слоев ферромагнитного и "немагнитного" металлов, имеющих либо коллинеарное (параллельное или антипараллельное), либо неколлинеарное (управляемое) упорядочение соседних ферромагнитных слоев. Сверхрешетки Fe/Cr, синтезированные по этой технологии, не уступают по величине гигантского магниторезистивного эффекта зарубежным аналогам.

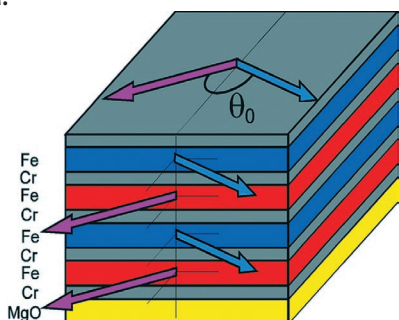


Рис. 1

Схема эпитаксиальной сверхрешетки Fe/Cr с неколлинеарным упорядочением магнитных моментов слоев Fe.

Комплексные исследования структуры и магнитотранспортных свойств мультислойных магнитных наноструктур Fe/Cr показали наличие уникальных магнитотранспортных свойств у сверхрешеток с ультратонкими магнитоизотропными и с относительно толстыми (70-100 ангстрем) магнитоанизотропными слоями Fe.

На магнитоанизотропных сверхрешетках Fe/Cr с толстыми слоями Fe показана возмож-

ность управления процессом перемагничивания отдельных ферромагнитных слоев. Это достигается в случае, когда энергия одноосной магнитной анизотропии в плоскости слоев близка по величине к энергии обменного взаимодействия между соседними слоями Fe. Перемагничивание сверхрешетки происходит путем реализации набора спин-флип фазовых переходов первого рода со  $180^\circ$  изменением направления магнитных моментов отдельных слоев. В результате этого полевые зависимости намагниченности  $M(H)$  и магнитосопротивления  $\Delta R/R(H)$  приобретают ступенчатый характер.

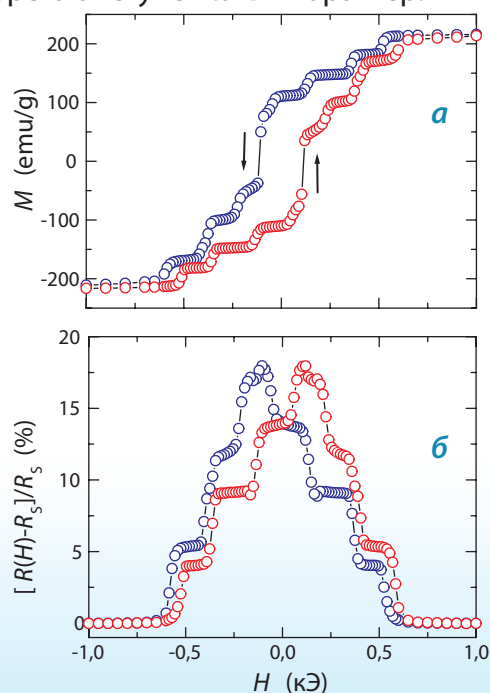


Рис. 2

Зависимости  $M(H)$  (а) и  $\Delta R/R(H)$  (б), полученные при  $T=4.2$  К на сверхрешетке  $[\text{Fe}(85\text{\AA})/\text{Cr}(13.6\text{\AA})]_{12}$ , выращенной на подложке (211)MgO.

Впервые показано, что магнитотранспортные свойства сверхрешеток Fe/Cr с ультратонкими слоями Fe существенно изменяются не только при переходе слоев Fe (при толщинах, менее 5 ангстрем) от сплошного состояния к кластерному, а в магнитном отношении – от ферромагнитного состояния к суперпарамагнитному, но и приобретают уникальные особенности с дальнейшим уменьшением концентрации и размеров кластеров Fe в кластерных слоях. Одна из этих особенностей состоит в том, что у наноструктур с толщиной слоев Fe менее 2 ангстрем, происходит ниже некоторой температуры  $T_K$  увеличение электросопротивления, т.е. имеет место инверсия знака температурного коэффициента сопротивления. Значение температуры  $T_K$  с уменьшением концентрации атомов Fe в кластерных слоях повышается. В частности, в наноструктуре Fe/Cr, имеющей усредненную толщину слоев Fe, равную 0.6 ангстрема, возрастание электросопротивления наблюдается при охлаждении уже с комнатной температуры.

Другая важная особенность магнитотранспортных свойств кластерно-слоистых наноструктур заключается в том, что их температурные аномалии при наложении магнитного поля уменьшаются или исчезают совсем, подобно тому, как это наблюдается у сплавов, обладающих эффектом Кондо. На рис. 3 показано изменение аномальной температурной зависимости электросопротивления, характерной для кластерно-слоистых наноструктур Fe/Cr с кластерными слоями Fe, разделенными сплошными слоями Cr, толщиной 10 Å, при увеличении напряженности  $H$  внешнего постоянного магнитного поля.

Проведен теоретический анализ результатов исследований эволюции атомной структуры, магнитных, электрических, магниторезистивных, магнитооптических и высокочастотных свойств кластерно-слоистых наноструктур

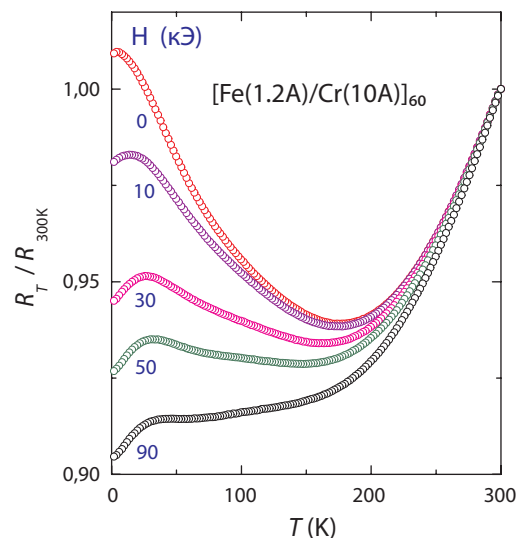


Рис. 3

Температурные зависимости электросопротивления кластерно-слоистой наноструктуры  $MgO/Cr(80\text{\AA})/[Fe(1.2\text{\AA})/Cr(10\text{\AA})]_{60}$  в постоянном магнитном поле разной напряженности  $H$ .

Fe/Cr при уменьшении концентрации и размеров кластеров Fe. Показано, что обнаруженное Кондо-подобное поведение электросопротивления кластерно-слоистых наноструктур обусловлено их специфической суперпарамагнитной структурой, изменяя которую с помощью магнитного поля можно увеличить гигантский магниторезистивный эффект при азотных и гелиевых температурах в десятки раз.

Следует отметить, что кластерно-слоистые наноструктуры, обладающие суперпарамагнитными свойствами, Кондо-подобным поведением электросопротивления и гигантским магнитосопротивлением представляют интерес не только для научных исследований, но и для разработки на их основе магнитных устройств, в частности, высокочувствительных сенсоров магнитного поля.

Более подробно с представленными результатами и выводами можно ознакомиться в публикациях<sup>[1-3]</sup>

<sup>1</sup> V.V. Ustinov, M.A. Milyaev, L.N. Romashev, T.P. Krinitsina, A.M. Burkhanov, V.V. Lauter-Pasyuk, H.J. Lauter JMMM 300, #1 (2006) e281

<sup>2</sup> V.V. Ustinov, M.A. Milyaev, L.N. Romashev, T.P. Krinitsina, A.M. Burkhanov, V.V. Lauter-Pasyuk, H.J. Lauter Phys. Stat. Sol. (c) 3, #5 (2006) 1249

<sup>3</sup> V.V. Ustinov, L.N. Romashev, M.A. Milyaev, A.V. Korolev, T.P. Krinitsina, A.M. Burkhanov JMMM 300, #1(2006) 148