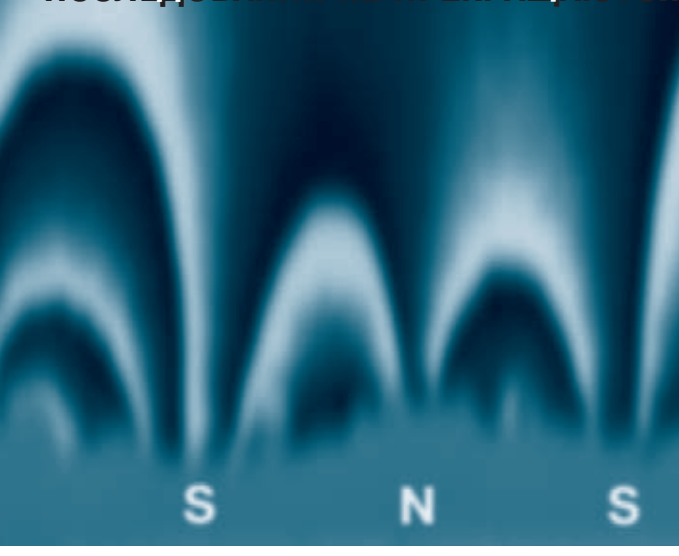


# МАГНИТОРЕЗИСТИВНЫЕ МАТЕРИАЛЫ

ИССЛЕДОВАНИЯ НЕ ПРЕКРАЩАЮТСЯ

**Тонкопленочные магниторезистивные материалы широко применяются для изготовления высокочувствительных преобразовательных элементов, на базе которых создаются разнообразные современные приборы – накопители информации большой емкости, измерители малых и больших электрических токов, магнитометры, диагностические устройства. Особенно перспективны материалы с гигантским магнетосопротивлением (ГМС), которые до недавнего времени считались любопытными лабораторными “поделками”, а теперь быстро находят применение в накопителях большой емкости. Это и объясняет интерес к экспериментальному и теоретическому исследованию одно- и многослойных магниторезистивных материалов. Что же получено на сегодняшний день?**

**Б**ольшой интерес сегодня вызывают **гетерогенные тонкие пленки** на базе ферромагнитных металлов (железа, кобальта, никеля) с гигантским магнетосопротивлением. Первые статьи, посвященные изучению гигантского магнетосопротивления в таких пленках, появились сравнительно недавно – в 1992 году [1,2], хотя сведения о ГМС были опубликованы значительно раньше [3]. Исследования показали, что однослойные гетерогенные системы с ГМС могут заменить многослойные пленки и материалы со спиновой блокировкой [4–6]. К особенностям однослойных гетерогенных пленок с ГМС можно отнести: уменьшение их электрического сопротивления  $R$  с увеличением напряженности внешнего магнитного поля до величины, превышающей коэрцитивную силу; получение максимального значения  $R$  при нулевой намагниченности; изотропность  $R$  практически в любом поле; значительно большую величину магнетосопротивления, чем у пленок пермаллоя (2%). Большое относительное магнетосопротивление  $D_r/I_r$  гетерогенных пленок связано с образованием частиц одного или более ферромагнитных металлов сравнительно небольшого размера (около 10 нм). Исследо-



ваниями установлено, что для гетерогенных пленок зависимость  $D_r/I_r$  от относительной намагниченности  $M(H)/M_s$  ( $M_s$  – намагниченность насыщения) близка к квадратичной. С уменьшением температуры величина  $D_r/I_r$  резко возрастает и может достигать 85%. Гетерогенные пленки – метастабильны и могут быть получены методами вакуумного испарения, ионно-плазменного напыления и легирования. Термообработка тонкопленочных образцов с близким к однородному метастабильным состоянием приводит к увеличению числа локальных флуктуаций, вызывающих фазовую сегрегацию и образование кластеров в магнитной среде.

На сегодняшний день достаточно хорошо изучены гетерогенные пленки CrFe, максимальная величина  $D_r/I_r$  которых при температуре 4,2K в магнитном поле 14 Тл составляет 37,3%. Следует отметить, что это значение получено для пленок с атомарной долей железа 20%, осажденных ионно-плазменным методом на кремниевые подложки, нагретые до температуры 200°C. При осаждении пленок того же состава на подложки, охлаждаемые жидким азотом, величина  $D_r/I_r$  оказалась значительно меньше – около 25%. При большем атомарном содержании железа (до 40%) температура подложки существенно не влияет на величину  $D_r/I_r$ .

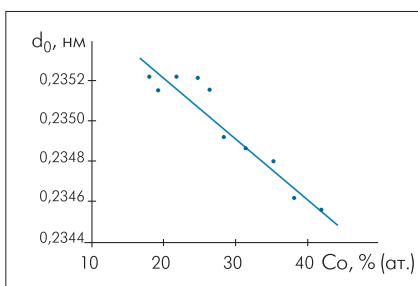
ГМС может наблюдаться и в гетерогенных системах на базе сплавов, в которых ферромагнитные частицы хорошо диспергированы в немагнитной металлической матрице и объединены в однодоменные магнитные фракции [4]. В таких сплавах случайное распределение однодоменных фракций определяет эффективность зависящего от ориентации спинов рассеяния электронов, а с этим показателем связана величина относительного магнетосопротивления [1–15]. Подобные гетерогенные системы могут быть сформированы на основе медной или серебряной матрицы, в которой частицы железа, кобальта и никеля хорошо диспергируются. При комнатной температуре они не растворимы в серебряной среде. То же можно сказать о растворимости железа и кобальта в медной среде. Процесс диспергирования ферромагнитных частиц в медной среде протекает медленнее, чем в серебряной, что можно объяснить различной степенью несоответствия параметров кристаллических решеток меди, серебра и ферромагнитных металлов.

## Представляем автора статьи

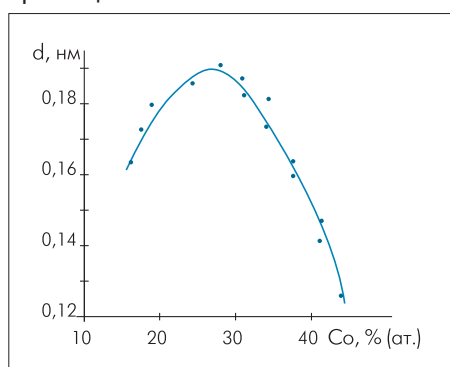
**КАРПЕНКОВ Степан Харланович.** Доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой Государственного университета управления. Лауреат Государственной премии РФ в области науки и техники, академик Российской академии естественных наук. Удостоен Государственной научной стипендии. Автор восьми книг, в том числе четырех монографий, посвященных высокочувствительным преобразователям и тонкопленочным накопителям информации.

Особый интерес представляют **тонкопленочные гетерогенные материалы на основе серебра**, величина  $\Delta r/r$  которых даже при комнатной температуре достаточно велика. Так, для однослойных пленок CoAg она может превышать 22%. К настоящему времени однослойные пленки CoAg, выращенные методом магнетронного распыления на кремниевых подложках при комнатной или более низкой температуре, а также на подложках из гранулированного стекла, исследованы достаточно подробно.

Рентгеноструктурный анализ пленок CoAg, напыленных на монокристаллические кремниевые подложки с ориентацией поверхности (100) при комнатной температуре, показал, что им присуща преимущественно кристаллографическая ориентация плоскостей



**Рис. 1. Зависимость постоянной решетки пленок CoAg от состава пленки**



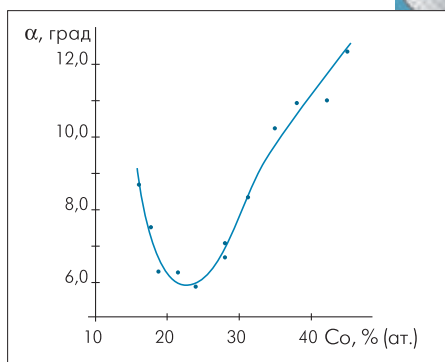
**Рис. 2. Зависимость размера кристаллических зерен от состава пленки CoAg**

увеличивается. При этом оба максимума становятся острее. Полученные результаты, помимо наличия метастабильного состояния, можно объяснить и ростом обогащенных кобальтом фракций в серебряной среде при термообработке. Нельзя полностью исключить и формирование обогащенной кобальтом фазы в процессе осаждения пленки на подложку при комнатной температуре.

После термообработки  $\Delta r/r$  пленок CoAg увеличивается примерно на 5%. Но при повышении температуры отжига до 400°C величина  $\Delta r/r$  существенно уменьшается. Таким образом, при значениях температуры отжига 200–400°C относительное значение магнетосопротивления максимально, а удельное электрическое сопротивление в магнитном поле с максимальной напряженностью минимально.

Изучение кристаллографических свойств пленок CoAg толщиной 500–600 нм показало, что постоянная решетки  $d_0$  в плоскости (100)

с увеличением содержания кобальта уменьшается почти линейно (рис.1). После двойного отжига пленок при температуре 300°C в вакууме около  $1,5 \cdot 10^{-4}$  Па в течение 30 мин постоянная решетки для всех образцов с различным содержанием кобальта несколько уменьшается.



**Рис. 3. Зависимость среднего угла отклонения  $\alpha$  от состава пленки CoAg**

Размер кристаллических зерен  $d$  максимален при атомарном содержании кобальта около 28% (рис.2). Количественный анализ кристаллографической текстуры в плоскости (111) свидетельствует о ее корреляции с размерами зерен. Максимальный размер зерен соответствует минимальному среднему углу отклонения  $\alpha$  плоскостей (111) от плоскости пленки, и таким образом по углу  $\alpha$  можно качественно оценить степень кристаллографического текстурирования (рис.2,3). Термообработка независимо от состава пленки приводит к незначительному изменению угла  $\alpha$ .

У пленок CoAg, прошедших двойную термообработку, даже в относительно сильном магнитном поле (напряженность не менее 1000 кА/м) эффект насыщения не наблюдается (рис. 4). В то же время  $\Delta r/r$  отожженных пленок существенно зависит от их состава и при атомарной доли кобальта 38% достигает максимального значения – примерно 28% (рис.5). Столь же сильная зависимость от состава пленок при атомарной доли кобальта более 30% характерна и для коэрцитивной силы (рис.6). На величину  $\Delta r/r$  и коэрцитивную силу пленок с атомарной долей кобальта до 30% термообработка влияет незначительно.

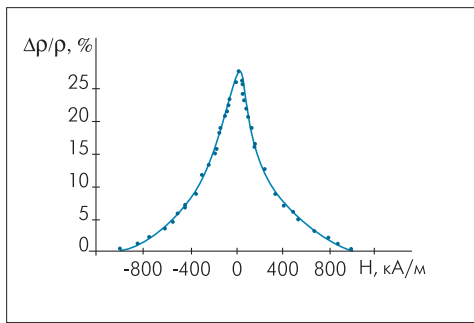
Исследование с помощью растрового электронного микроскопа пленок CoAg с атомарным содержанием кобальта от 10 до 60%, осаждаемых на охлаждаемые водой подложки, позволило обнаружить кобальтовые кластеры в матрице серебра с линиями, соответствующими плоскости (200) гранецентрированной структуры кобальта [7]. Предполагается, что рассеяние на таких кластерах и обуславливает гигантское магнетосопротивление пленок CoAg. Величина  $\Delta r/r$  этих пленок при температуре 30К может достигать 30%.

Таким образом, данные рентгеноструктурного анализа пленок CoAg свидетельствуют о наличии метастабильного состояния сплава, а результаты исследования кристаллографических, магниторезистивных и магнитных свойств – о том, что сравнительно большое ГМС обусловлено магнитными и композитными неоднородностями системы, в частности образованием кобальтовых кластеров относительно больших размеров.

## Фирма Read-Rite вновь начала поставки ГМС-головок компании Quantum

После двухлетнего перерыва Read-Rite снова начала поставку считывающих головок на базе магниторезистивного материала с гигантским магнетосопротивлением крупнейшему производителю накопителей на магнитных дисках – компании Quantum. Головки с плотностью 6,2 Гбит/кв.дюйм предназначены для серии дисковых накопителей с минимальной емкостью 8,7 Гбайт/диск, которые найдут применение в дешевых ПК. Фирма Read-Rite также ведет совместные с Quantum работы по созданию разнообразных программ для настольных и промышленных компьютеров.

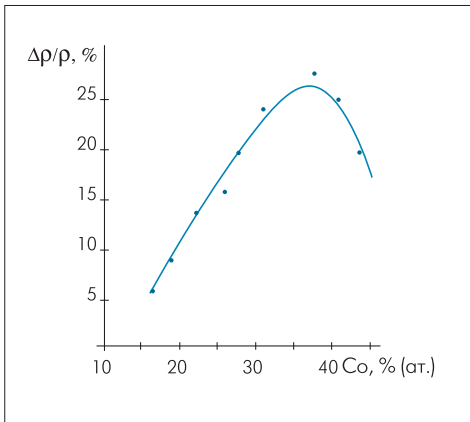
[www.edtm.com](http://www.edtm.com)



**Рис. 4. Зависимость  $\Delta\rho/\rho$  от напряженности магнитного поля для дважды отожженных образцов CoAg с атомарной долей кобальта 38%**

Интересны результаты изучения магниторезистивных свойств пленок двух типов – FeAg и CoAg, напыляемых магнетронным распылением из композитной мишени [8] и на охлаждаемые водой кремниевые подложки [9]. Структура таких пленок с атомар-

ным содержанием железа 15 и 25%, кобальта 55 и 20%, соответственно, зернистая. Правда, сразу после напыления пленки второго типа имели гранецентрированную кубическую наноструктуру. Но отжиг с увеличением температуры с 200 до 700°C приводит к росту кристаллических зерен и фазовому разделению атомов, входящих в состав пленки. Относительное магнетосопротивление пленок первого типа при температуре 6К в магнитном поле 5 Тл превышало 25%, пленок второго типа – примерно 25 и 14% при температуре 20К. С увеличением температуры с 4



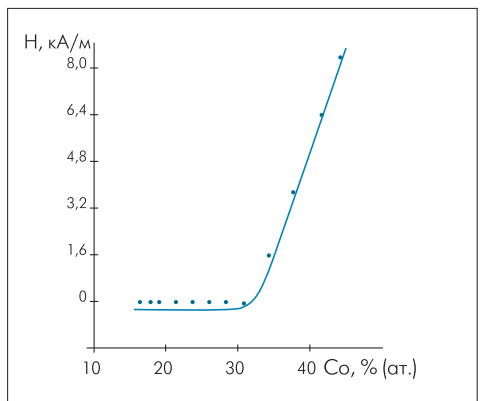
**Рис. 5. Зависимость  $\Delta\rho/\rho$  от состава пленки CoAg**

до 300К  $\Delta\rho/\rho$  уменьшается до 8%. Кроме того, термообработка пленок с атомарным составом Co(20%)Ag(80%) показала, что при относительно невысокой температуре процесса магнетосопротивление незначительно возрастает. Изучение термопроводности и термоэлектрической мощности этих пленок позволило установить, что магнитотермические гигантская проводимость и мощность коррелируют с величиной гигантского магнетосопротивления [10]. Экспериментально показано, что в довольно широком диапазоне температур (2–300К) удовлетворительно выполняется закон Видемана–Франца, и при столкновении электронов проводимости с поверхностью ферромагнитных зерен преобладает процесс упругого рассеяния электронов под сравнительно большими углами. Термоэлектрическая мощность образцов с повышением температуры отжига существенно уменьшалась.

Изучение пленок AgNiFe, формируемых магнетронным распылением пермаллоя и серебра в атмосфере аргона, позволило сделать вывод, что при небольшом содержании серебра преобладает ферромагнитное взаимодействие, а при его увеличении возникает суперпарамагнитное состояние. Такие результаты согласуются с теоретическими выводами, согласно которым магнетосопротивление обусловлено рассеянием поляризованных электронов проводимости на поверхности ферромагнитных зерен, распределенных в немагнитной матрице.

Не прекращаются и работы по совершенствованию **многослойных магниторезистивных элементов** с сравнительно высокими значениями относительного магнетосопротивления

[16–22]. Особое внимание здесь уделяется обеспечению термической стабильности магниторезистивных преобразователей для накопителей информации на магнитных дисках. На сегодняшний день наилучшая термостабильность получена для материалов с ге-



**Рис. 6. Зависимость коэрцитивной силы от состава пленки CoAg**

матитовым ( $\alpha$ -Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) антиферромагнитным слоем [16–18]. Критическая температура массивного гематита равна 675°C. Этот материал характеризуется высокой коррозионной стойкостью, а поскольку он – диэлектрик, при его использовании исключается нежелательное отвлечение задающего тока.

Изучение термостабильности многослойных тонкопленочных материалов с антиферромагнитным гематитовым слоем, формируемых путем последовательного ионно-плазменного осаждения на стеклянную подложку слоев гематита, пермаллоя и тантала толщиной 10 нм каждый, не дало обнадеживающих результатов. Кривая перемагничивания такой структуры с оптимальным стехиометрическим составом гематитового слоя (соотношение кислорода и железа – 1,46), получаемым путем изменения потока кислорода в процесс осаждения, свидетельствует о наличии одноосной анизотропии, поле которой при увеличении температуры с комнатной до 250°C монотонно уменьшается примерно с 40 Э до нуля. Такую температурную зависимость можно объяснить слабо выраженной кристаллографической текстурой гематитового слоя.

Поле анизотропии заметно уменьшается и при увеличении температуры отжига пленок Ta/NiFe/ $\alpha$ -Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>. Сравнительно невысокая термостабильность магнитных свойств таких пленок, очевидно, обусловлена обнаруженной электронно-спектроскопическими исследованиями диффузией железа из пермаллового в гематитовый слой. Этот процесс активизируется с повышением температуры отжига. Замена слоя пермаллоя кобальтом примерно той же толщины приводит к тому, что намагниченность насыщения трехслойных пленок Ta/Co/ $\alpha$ -Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> практически не изменялась при увеличении температуры отжига до 250°C.

С точки зрения применения многослойных материалов важна термостабильность не только магнитных, но и магниторезистивных свойств материалов с сравнительно большими значениями  $\Delta\rho/\rho$ . Этими качествами обладают пленки, состоящие из магнитных, антиферромагнитных и электропроводящих слоев, такие как  $\alpha$ -Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>(100)/Co(2)/Cu(2,7)Co(1)/NiFe(5)/Co(2)/Ta(10)\*. Относительное магнетосопротивление такой пленки, равное примерно 6%, и ее чувствительность, составляющая около 1%/Э, мало изменялись вплоть до температуры отжига 270°C.

Достаточно высокой термостабильностью характеризуются и многослойные пленки с интерферромагнитным слоем RuRhMn, имеющие к тому же высокую коррозионную стойкость [18–20]. Лучшие результаты получены для антиферромагнитного слоя толщиной 10 нм и состава Ru<sub>4</sub>Rh<sub>11</sub>Mn. Температура блокировки напыленной на стеклянную подложку структуры типа

\*В скобках дана толщина слоев в нанометрах.





Ta(5)/NiFe(7)/Co(0,5)/Cu(3)/ Co(2,5)/RuRhMn(10)/Ta(5) равна примерно 250°C, поле одноосной анизотропии 350 Э. Относительное магнетосопротивление структуры – около 7,4%.

Таким образом, многослойные материалы можно считать перспективными для изготовления высокочувствительных элементов с высокой термостабильностью. ○

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Berkowitz A. et al. – Phys. Revol.Lett., 1992, vol.68, p.3745.
2. Xiao J. et al. – Phys. Revol. Lett., 1992, vol.61, p.2472.
3. Baibich M. et al. – Phys. Revol. Lett., 1988, vol.68, p.3749.
4. Thomson S. et al. – IEEE Trans. on Magnetics, 1994, vol.30, p.726.
5. Карпенков С. – Зарубежная электронная техника.-М.: ЦНИИ “Электроника”, 1997, №2, с.61.
6. Карпенков С. –Информатика–машиностроение, 1999, №2, с.50.
7. Tsoukatas A. et al. – IEEE Trans. on Magnetics, 1993, vol.29, p.2726.

8. Liou S. et al. – J. Appl. Phys., 1993, vol.73, p.5539.
9. Tsoukatas A. et al. – J. Appl. Phys., 1993, vol.73, p.5509.
10. Piroux et al. – IEEE Trans. on Magnetics, 1993, vol.29, p.2700.
11. Parker M. – IEEE Trans. on Magnetics, 1996, vol.33, p.135
12. Карпенков С. – Электроника: Наука, Технология, Бизнес, 1997, №6, с.17.
13. Berrowitz A. et al. – IEEE Trans. on Magnetics, 1994, vol.30, p.346.
14. Bamard J. et al. – J. Appl. Phys., 1993, vol.73, p.6372.
15. Watson M. et al. – J. Appl. Phys., 1993, vol.73, p.5506.
16. Sano M. et al. – IEEE Trans. on Magnetics, 1998, vol.34, p.372.
17. Abarra E. et al. – IEEE Trans. on Magnetics, 1998, vol.34, p.363.
18. Lin J. et al. – IEEE Trans. on Magnetics, 1998, vol.34, p.375.
19. Araki S. et al. – IEEE Trans. on Magnetics, 1998, vol.34, p.387.
20. Chen G. et al. – IEEE Trans. on Magnetics, 1998, vol.34, p.375.
21. Карпенков С. – Зарубежная электронная техника. – М.: ЦНИИ “Электроника”, 1998, №1, с.69.
22. Карпенков С. – Тонкопленочные накопители информации.– М.: Радио и связь, 1993.

## Магнитные полупроводники

– пока мало известное, но быстро развивающееся направление электроники

Уже сегодня новая технология, называемая магнитоэлектроникой, позволила увеличить емкость дисковых накопителей до 20 Гбайт благодаря применению высокочувствительных головок считывания на базе спиновых магнитных вентилей с гигантским магнетосопротивлением (ГМС). Но это лишь один пример широких возможностей магнитоэлектронных приборов. Сейчас разрабатывается множество других устройств, которые, по-видимому, окажут аналогичное влияние на технологию энергонезависимой памяти.

На ежегодной Международной конференции по электронным приборам 1999 года (IEDM) ученые Джо Де Бок и Густав Боргс из Межуниверситетского центра микроэлектроники Бельгии (IMEC) сообщили об исследованиях так называемых “разбавленных магнитных полупроводников” – материалов, в которых используются такие эффекты, как спиновая инжекция. На его основе, по мнению исследователей, можно создать транзисторы с магнитоуправляемыми затворами, известные как ферромагнитные/полупроводниковые устройства со спиновым переносом. Магнитные характеристики этих устройств зависят от напряжения, тока и света. К тому же их структуру можно масштабировать наподобие полупроводниковых приборов.

Еще раньше, в 1998 году, ученые IMEC сообщили о создании магнитного ОЗУ (МОЗУ) – матрицы из 3х3 ячеек на базе спиновых вентилей, выполненной по 1,0-мкм арсенидгаллиевой технологии. Спиновой вентиль представляет собой многослойную структуру Co/Cu/NiFe. Для адресации ячейки памяти применяется GaAs-диод. Каждый магнитный слой имеет определенную ориентацию вектора намагниченности, причем сопротивление многослойной структуры зависит от того, совпадают ли ориентации векторов или нет. Величина сопротивления интерпретируется как логический “0” или “1”. Основное достоинство такого устройства – энергонезависимость. К тому же число переключений вектора намагниченности теоретически не ограничено и зависит от старения магнитной структуры. Значения времени считывания и записи определяется временем задержки схемы и приложенным магнитным полем ячейки, время переключения которой лежит в диапазоне нескольких наносекунд.

Следующий шаг специалистов – создание магнитных туннельных переходов. В таких вертикальных приборах два магнитных слоя разделены туннелируемым слоем окисла (как правило, оксидом алюминия). Туннелирование электронов через оксид и, следовательно, сопротивление структуры зависит от согласования векторов намагниченности магнитных пленок. Устройства характеризуются высоким сопротивлением и большим диапазоном его изменения (до 28%). Разработчики считают, что такие приборы позволят создать МОЗУ большой емкости с высоким быстродействием.

Выбор арсенида галлия обусловлен относительной простотой выращивания магнитных пленок поверх него. Процесс изготовления совместим с кремниевой технологией, но для его реализации требуется более серьезная подготовка, больше времени и денег. Правда, специалисты фирмы Honeywell еще в 1997 году продемонстрировали КМОП-схему энергонезависимого ОЗУ на базе ГМС-материала. Работы IMEC предполагается продолжить в содружестве с INESC (Португалия) в рамках европейского проекта Esprit.

Помимо ГМС-материалов и устройств со спиновым переносом ведутся исследования “ферромагнитных/полупроводниковых материалов с полем рассеяния”. В приборах на базе таких материалов небольшой переключаемый магнит создает поле, модулирующее ток.

Наиболее перспективные в ближайшее время новые области применения магнитоэлектронных приборов – автомобильная электроника и средства управления двигателями.

[www.edtn.com/story/tech/OEG19991022S0011-R](http://www.edtn.com/story/tech/OEG19991022S0011-R)  
[www.edtn.com/news/july15/071598news5.html](http://www.edtn.com/news/july15/071598news5.html)