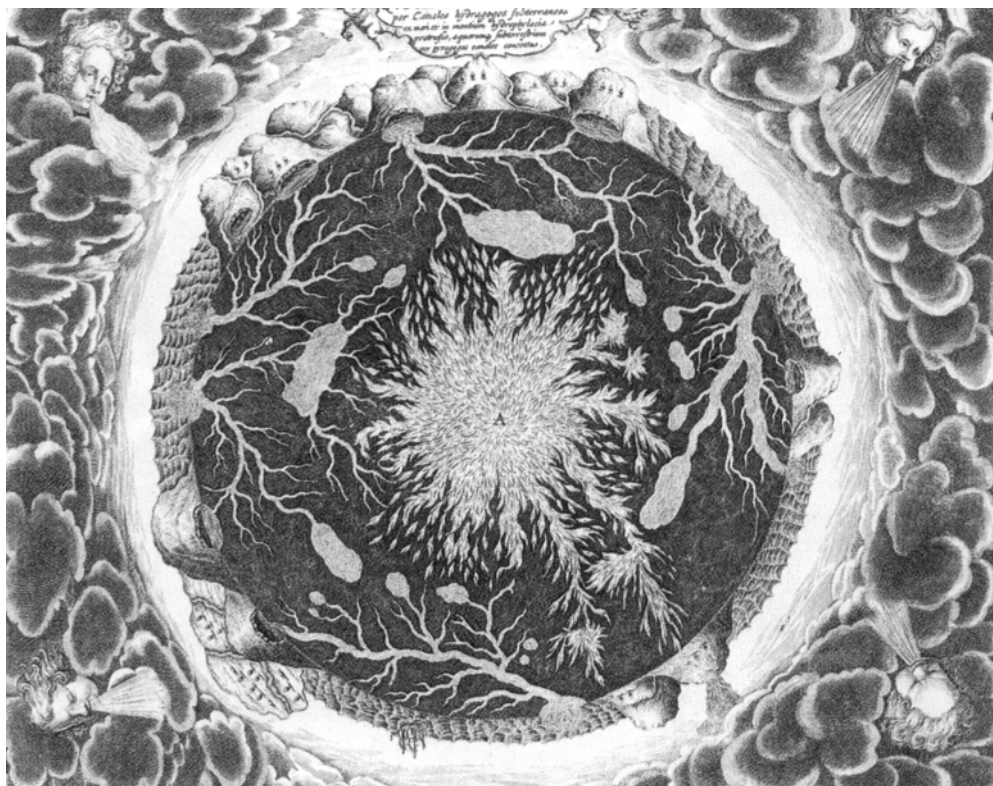


Магнитное сито для электронов

Нобелевский комитет присудил премию 2007 года по физике двум ученым: Альберу Феру из Парижского университета в Орсе (Франция) и Петеру Грюнбергу из Института исследовательского центра Юлиха, которые одновременно открыли эффект гигантского магнитного сопротивления. А началась эта история лет сто пятьдесят назад, когда Уильям Томсон, он же лорд Кельвин, обнаружил, что электрическое сопротивление ферромагнетика слегка зависит от того, приложено к нему внешнее магнитное поле или нет. Этот эффект он назвал магнетосопротивлением, во второй половине XX века стали использовать для измерения постоянного магнитного поля.

Электрический заряд легко создать и измерить, но трудно удержать — всякая пролетевшая мимо молекула старается этот заряд забрать и унести с собой. «Заряд» магнитный сделать тоже не сложно, достаточно поднести к магнитному материалу другой магнит. Если материал потом не нагревать, то он будет бесконечно долго сохранять намагниченность, во всяком случае, до тех пор, пока к нему снова не поднесут магнит. Именно поэтому магнитная память стала основой для хранения информации. Однако для ее считывания нужно уметь фиксировать наличие магнитного поля у небольшого участка материала. А это сделать не очень просто, тем более что в современной технике принято узнавать все величины через измерения электрического тока. И магнитное поле — не исключение.

Способов определения магнитного поля по создаваемым им электрическим эффектам несколько. Один из них — упомянутое магнетосопротивление. К сожалению, даже в самом лучшем сплаве — пермалое, который на 20% состоит из железа и на 80% из никеля, его величина не превышает нескольких процентов, поэтому точность измерения должна быть высока. И вплоть до конца восьмиде-

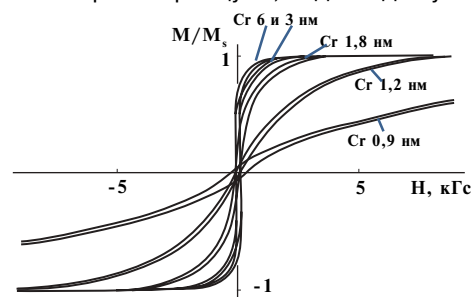


сятых годов XX века ученые полагают, что ничего с этим поделать нельзя, надо работать с тем материалом, который есть у них в руках, а на лучшее надеяться не приходится.

Все изменилось в 1988 году, когда был открыт эффект гигантского магнетосопротивления: оказалось, что многослойная пленка из слоев железа и хрома в магнитном поле уменьшает свое сопротивление вдвое!

По опубликованным статьям сложно понять, что заставило ученого заняться исследованием того или иного объекта. Возможно, Альбер Фер еще с 1976 года размышлял, как применить обнаруженный им с Яном Кемпбеллом изысканный эффект. Суть его состоит в том, что если сделать разбавленный твердый раствор хрома в железе (так, чтобы отдельные атомы примеси были равномерно разбросаны по всему объему образца), то можно заметить, что на этих атомах электроны с одной ориентацией спина будут в магнитном поле рассеиваться в шесть раз сильнее, чем с другой, и соответственно двигаться гораздо медленнее. То есть получается, что сопротивление зависит от спина. А может быть, у его коллеги из Юлиха просто была задача всесторонне исследовать в поисках чего-нибудь нового всевозможные пластинчатые структуры, которые можно получать напылением. Благо новым объектом была любая такая структура: в то время выращивание многослойных пленок методом эпи-

таксии еще только начиналось и соответствующие установки были отнюдь не в каждом крупном университете. Как бы то ни было, практически одновременно ученые обеих групп делали одно и то же: на подложке из арсенида галлия выращивали слои железа и перемежали их тончайшими слоями хрома. А потом изучали магнитные и электрические свойства получающихся сверхрешеток. Немцы с присущей им педантичностью исключили все лишние факторы и ограничились сэндвичем из двух слоев железа, между которыми был хром. Французы, видимо для уп-

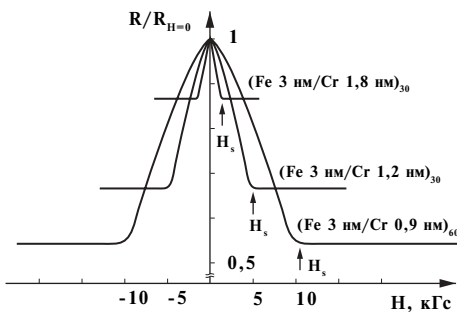


1 Когда прослойки хрома толстые, железохромовая сверхрешетка ведет себя во внешнем магнитном поле как ферромагнетик: при увеличении поля намагничивается, а при уменьшении выписывает петлю гистерезиса с остаточной намагниченностью. При тонких прослойках поведение иное: без поля намагниченности почти совсем нет, зато для перемагничивания требуется приложить гораздо большие усилия



рощения измерений, выращивали толстую структуру из тридцати, а то и шестидесяти слоев. При этом они еще и варьировали толщину хромовой прослойки. Как оказалось, эта толщина играет важнейшую роль: если она оказывалась менее 3 нм, слои железа начинали себя вести совершенно не так, как при толстой прослойке.

Тут придется прервать рассказ о работах свежеепеченных лауреатов и напомнить читателям, как получается магнит. У каждого электрона есть магнитный момент, спин, который может занимать два состояния, условно говоря, быть направленным вверх или вниз. Обычно спины электронов в равной степени направлены в разные стороны, и суммарный магнитный момент равен нулю. Однако у атомов некоторых металлов с д- и f-оболочками в силу причин, описываемых квантовой теорией, спины этих электронов порождают локализованные магнитные моменты, которые способны при охлаждении ниже некоторой критической температуры выстраиваться друг относительно друга закономерным образом. Типов же выстраивания может быть тоже два. В одном случае все моменты выстраиваются в одну сторону — такое свойство материалов называется ферромагнетизмом, критическая температура — температурой Кюри, а образец становится сильным магнитом.



2
Чем тоньше прослойка хрома и больше число слоев, тем сильнее проявляется эффект гигантского магнетосопротивления

Другой вариант — направления магнитных моментов в ряду атомов начинают чередоваться. Этот порядок называется антиферромагнитным, температура названа в честь Луи Нееля, а образец остается немагнитным. Железо — типичный ферромагнетик с температурой Кюри 1043К. Хром же — не менее типичный антиферромагнетик с температурой Нееля 311К.

Так вот, в опытах со слоистыми структурами из железа и хрома при толстых прослойках последнего у соседних слоев железа спины электронов были направлены в одну и ту же сторону, создавая аналог ферромагнетизма уже на макроскопическом уровне, а при тонких прослойках они давали картину антиферромагнетизма. Однако в достаточно сильном магнитном поле этот антиферромагнитный порядок разрушался, и магнитные моменты всех атомов всех слоев железа выстраивались в одну сторону. Строго говоря, это явление в 1985 году первым заметил Чак Майкрзак из Брукхейвенской национальной лаборатории (США) в сверхрешетке, построенной из слоев магнитного гадолиния и немагнитного иттрия. (Кстати, в 1983 году он работал в том же институте, что и Грюнберг.) Если бы Майкрзаку пришла в голову мысль проверить электрические свойства такой структуры, то Нобелевская премия могла бы достаться ему.

А вот ученые из Франции и Германии электрические свойства железохромовых сверхрешеток тщательно измерили и получили новый научный результат. Оказалось, что если пропускать ток вдоль слоев образца (пропускать поперек неудобно — сопротивление направлению очень велико), приложив к нему магнитное поле, то при разрушении антиферромагнитного порядка сопротивление сильно падает: у французов, которые проводили измерения в жидком гелии, на 50%, у немцев, при комнатной температуре, на 1,6% и 10% в жидком гелии. Поэтому эффект и назвали гигантским магнетосопротивлением.

Причина эффекта — замеченное Фером и Кемпбеллом различие в сопротивлении электронов с разными направлениями спинов. Слои очень тонкие, много меньше длины свободного пробега электрона. Поэтому, осуществляя электрический ток вдоль слоев, электроны из одного слоя железа неизбежно оказываются внутри другого слоя. При ферромагнитной ориентации слоев, если спин обеспечивает электрону меньшее сопротивление в одном слое, то оно окажется таким же малым и в другом. А при антиферромагнитной ориентации ситуация при каждом переходе из слоя в слой будет меняться: что было хорошо в одном, окажется плохо в другом. Поэтому в первом случае сопротивление определяют более быстрые электроны, а во втором все они оказываются в равной степени медленными.

Немцы первыми, в мае, прислали статью в «Physical Review B», в раздел «Rapid communications». Однако рецензент сделал ценные замечания и отправил статью на доработку. А доработанную статью опубликовали в марте 1989 года. Французы прислали свою заметку в журнал «Physical Review Letters» в августе 1988 года, и ее сразу приняли в печать. Результатом же стала настоящая лавина работ по изучению магнитных и электрических свойств подобных слоистых структур. На открытие эффекта очень быстро обратили внимание инженеры из исследовательского центра IBM и спустя пять лет создали жесткий диск высокой плотности записи, которую обеспечивала головка с гигантским магнетосопротивлением. И с тех пор этот эффект воплотился в миллионах головок жестких дисков, без которых невозможно себе представить современный компьютер, плеер, видекамеру и многие другие устройства информационной эры.

Кандидат физико-математических наук
С.М. Комаров