

при этом электр. поле ортогонально магнитному (скрещенные поля). В таких полях плазма как целое дрейфует со скоростью  $\mathbf{v} = c\mathbf{E} \times \mathbf{B}/B^2$ , направленной от оси тороида, и, в конце концов, должна попасть на стенку камеры, отделяющей плазму от внешнего мира.

Чтобы воспрепятствовать уходу плазмы, магнитное поле усложняют. В тороидальном плазменном шнуре возбуждают продольный электр. ток, создающий полоидальное магнитное поле. Силовые линии суммарного магнитного поля (поля тороидального соленоида и полоидального поля тока в плазме) имеют вид спиралей, проворачивающихся вокруг оси плазменного шнура. Такое магнитное поле называют полем с вращательным преобразованием. В нём заряженные частицы движутся по довольно сложным траекториям, не выходя, однако, за пределы ограниченной области, поэтому электр. поляризации плазмы не происходит.

Электр. ток может возбуждаться как индукционным способом – наращиванием тока в дополнит. обмотках (индукторе), так и безындукционным – с помощью микроволн и инъекции высокоэнергетич. нейтральных атомов. Поскольку электр. ток в индукторе не может возрастать неограниченно, в первом случае токамак вынужден работать в импульсном режиме, т. е. плазма уходит на стенки камеры, когда рост тока в индукторе прекращается.

Вращательное преобразование магнитных силовых линий можно осуществить и без возбуждения тока в плазме. Возможны два таких способа: использование соленоида, ось которого не является плоской кривой (стелларатор с пространственной осью), и наложение на тороидальный соленоид винтовых проводников с током (обычный стелларатор и его модификации – торсатрон, гелиотрон и др.; рис. 2, б). Гл. преимущество стеллараторов перед токамаками – возможность стационарной работы без затраты энергии на генерацию тока в плазме, их недостаток – громоздкость конструкции.

Одним из параметров, характеризующих качество М. л., является параметр  $\beta = 8\pi p/B^2$ , где  $p$  – давление плазмы, удерживаемой в ловушке,  $B^2/8\pi$  – давление магнитного поля. В токамаках и стеллараторах эта величина мала по сравнению с единицей, что позволяет эффективно контролировать величину и конфигурацию магнитного поля этих ловушек.

При достаточно мощных разрядах плазма может так изменять конфигурацию магнитного поля, что возникают замкнутые ловушки, причём параметр  $\beta$  оказывается сравнимым с единицей. Так, при разряде в тороидальном магнитном поле оно может менять знак в некоторой части плазменного шнура (линия с обратным магнитным полем). Разряд в прямом магнитном поле, происходящий одновременно с его обращением,

может приводить к замыканию силовых линий магнитного поля и образованию конфигураций, называемых компактными торами, или конфигурациями с обратным магнитным полем. Однако время жизни таких объектов оказывается небольшим, и параметры плазмы (плотность, темп-ра) уступают достигнутым на токамаках и стеллараторах.

Осн. потери плазмы из замкнутых М. л. происходят за счёт её диффузии поперёк магнитного поля. Диффузия вызывается столкновениями заряженных частиц и хаотич. электр. полями, возникающими вследствие развития плазменных неустойчивостей. В однородном магнитном поле заряженные частицы при столкновениях смещаются поперёк магнитного поля на расстояния порядка ларморовского радиуса (классич. диффузия). В замкнутых М. л. смещения увеличиваются из-за сложной траектории заряженных частиц (неоклассич. диффузия). Однако обычно наиболее интенсивна т. н. аномальная диффузия, возникающая вследствие хаотич. смещений плазмы, дрейфующей в скрещенных полях (магнитном поле ловушки и электр. поле неустойчивых плазменных колебаний). Время диффузионного ухода возрастает с увеличением размеров плазмы. Поэтому эволюция М. л. шла по пути увеличения их размеров. Наилучшие результаты были получены на т. н. больших токамаках: JET (Joint European Torus, Европа), TFTR (Tokamak Fusion Test Reactor, США), JT-60 (Япония). Планируется сооружение междунар. токамака ITER (International Thermonuclear Experimental Reactor), что является одной из ступеней на пути создания пром. *термоядерного реактора*.

Лит.: Арцимович Л. А. Управляемые термоядерные реакции. 2-е изд. М., 1963; Трубинов Б. А. Теория плазмы. М., 1996; Ковальский Н. Г., Лукьянов С. Ю. Горячая плазма и управляемый синтез. М., 1999; Миямото К. Основы физики плазмы и управляемого синтеза. М., 2007; Морозов А. И. Введение в плазмодинамику. 2-е изд. М., 2008.

В. Д. Шафранов, А. В. Тимофеев.

**МАГНИТНЫЕ МАТЕРИАЛЫ**, вещества, обладающие магнитными свойствами, которые обеспечивают их широкое применение в технике. В осн. это ферро- и ферримагнетики (см. *Ферромагнетизм* и *Ферримагнетизм*). К ферромагнетикам относятся железо, кобальт, никель, гадолиний, диспрозий и некоторые др. редкоземельные металлы, их соединения и сплавы, некоторые сплавы и соединения марганца, хрома, урана. Ферромагнитные материалы характеризуются темп-рой Кюри (*Кюри точкой*,  $T_C$ ), ниже которой они являются магнитоупорядоченными и обладают ферромагнитными свойствами. В ферримагнетиках существуют две спиновые магнитные подсистемы с антипараллельным направлением спинов и с разными значениями магнитных моментов, поэтому суммарный магнитный момент ферримагнитного материала ниже темп-ры Нееля (*Нееля*

*точки*,  $T_N$ ) в отсутствие поля не равен нулю (за исключением точки компенсации). К ферримагнетикам относят *ферриты* – двойные оксиды переходных металлов со структурой шпинели, граната, гексагональной структурой. Типичный ферримагнетик – известный с древнейших времён магнетит  $Fe_3O_4$  (магнитный железняк). В М. м. могут существовать области спонтанной намагничённости (магнитные домены), поэтому они сохраняют отличную от нуля намагничённость и после выключения приложенного внешнего магнитного поля и являются основой для разработки и произ-ва постоянных магнитов, сред для магнитной записи информации и т. д.

Классификацию М. м. можно проводить по их осн. характеристикам: намагничённости насыщения  $M_s$ , остаточной намагничённости  $M_r$ , *коэффициентной силе*  $H_c$ , *магнитной проницаемости*  $\mu$ , темп-ре *магнитного фазового перехода* ( $T_C$  или  $T_N$ ), константам *магнитной анизотропии* ( $K_1$  и  $K_2$ ), *магнитострикции* и др. По лёгкости намагничивания и перемагничивания М. м. подразделяют на *магнитомягкие материалы* – материалы с малой величиной  $H_c$  и большой  $\mu$ , и *магнитотвёрдые материалы* – материалы с большими величинами  $H_c$  и  $M_r$ . Термины «магнитомягкий материал» и «магнитотвёрдый материал» определяют исключительно магнитные свойства М. м. и не характеризуют механич. свойства материалов. По характеру кристаллич. структуры М. м. могут быть поликристаллическими, монокристаллическими, аморфными. Широкое применение находят *магнитные плёнки* и *магнитные жидкости*.

Внешнее магнитное поле, воздействуя на М. м., может изменять его магнитные, электронные и структурные параметры, что может проявляться, напр., в изменении геометр. размеров М. м. (магнитострикция), его электр. сопротивления (см. *Магнитосопротивление*), удельного фарадеевского вращения, темп-ры (см. *Магнитокалорический эффект*). В ряде М. м. эти эффекты достигают гигантских величин, что обеспечивает широкое применение этих материалов в разл. областях техники и электроники. Так, по целевому назначению в отд. группы выделяют *магнитострикционные материалы*, *термомагнитные сплавы*, магнитодиэлектрики (см. в ст. *Магнитные диэлектрики*), магнитоопт. материалы, М. м. для СВЧ и др. В кон. 20 – нач. 21 вв. появились новые виды М. м., напр. магнитные наноструктуры.

Применение М. м. определяется общей совокупностью их свойств. Области применения М. м. чрезвычайно разнообразны. Они широко используются: для магнитной записи информации (*магнитная лента*, магнитные диски); в кредитных банковских картах; громкоговорителях, динамиках и микрофонах; электродвигателях и генераторах электр. тока

(в основе работы – закон электромагнитной индукции); трансформаторах; магнитных держателях; магнитных сепараторах и т. д. М. м. применяют также в диагностике и лечении разл. заболеваний (магнитная доставка лекарств, сорбция токсинов, лечение онкологич. заболеваний и т. п.).

Лит. см. при статьях *Магнитомягкие материалы* и *Магнитотвёрдые материалы*.

*В. И. Зверев, А. М. Тишин.*

**МАГНИТНЫЕ ПЛЁНКИ**, слои материала толщиной от долей нанометра до нескольких сотен нанометров, обладающие магнитными свойствами. В М. п. обнаруживают особые физич. свойства, не наблюдающиеся в объёмных образцах.

Существенное влияние на физич. свойства М. п. оказывает их кристаллич. структура. Кристаллич. решётка М. п. обладает высокой концентрацией дефектов. Дефекты и неоднородности существуют во всех плёнках, поскольку условия напыления как эпитаксиальных (монокристаллических), так и поликристаллич. плёнок далеки от равновесных. Это позволяет атомам перемещаться из узлов кристаллич. решётки в межузловые положения. Возможность такого перемещения характеризует неравновесное состояние решётки, которое зависит от физико-технологич. параметров (степени вакуума, темп-ры и структурных параметров подложки, скорости конденсации и физич. природы испаряемого материала). В плёнках образуется огромное число разл. неравновесных состояний, которым соответствуют определённые магнитные свойства. Для приведения плёнки в равновесное состояние необходима последующая термообработка. Структура и физич. свойства плёнок также зависят от толщины плёнки; при её уменьшении возрастает вклад поверхностных процессов по сравнению с объёмными.

Наибольший практич. интерес представляют тонкие М. п. Их свойства определяются в первую очередь эффектами, связанными с малой толщиной, – т. н. *размерными эффектами*. Это зависимость темп-ры магнитных фазовых переходов и спонтанной намагниченности от толщины плёнки. Кроме того, на свойства М. п. влияют подложка, на которую происходит осаждение, и наличие дефектов и примесей. Тонкие плёнки подразделяют на три типа. В первом (толщина более 10 нм предел толстой плёнки) при возрастании толщины свойства плёнки стремятся к свойствам объёмного материала. В промежуточном типе (толщина от 1 до 10 нм) плёнки (напр., эпитаксиальные) более или менее однородно напряжены и влияние границы раздела с подложкой ещё сравнительно невелико. В ультратонкой плёнке (менее 1 нм) влияние межфазных границ крайне велико и свойства плёнки в значит. степени определяются геометрией линии раздела с подложкой. Даже самые совершенные методы не позволяют получить идеальную двумерную плёнку (один слой

атомов) и ответить на фундам. вопрос о возможности существования магнитного упорядочения в идеальной двумерной М. п. при темп-ре, отличной от 0 К. Магнитные свойства этих трёх типов плёнок существенно различаются. Так, эксперименты показали, что заметное уменьшение спонтанной намагниченности и температуры Кюри наступает лишь в М. п. толщиной менее десятка атомных слоёв ( $< 3$  нм). В области низких температур наблюдается переход от *Блоха закона* для зависимости намагниченности от темп-ры, выполняющегося для толстых ферромагнитных плёнок, к почти линейному спаду намагниченности с темп-рой в ультратонких плёнках.

К М. п. относятся также плёнки, полученные чередованием множества слоёв магнитоупорядоченных и магнитоупорядоченных материалов. В таких мультислойных структурах между магнитными слоями осуществляется осциллирующее *косвенное обменное взаимодействие*, называемое межслойным обменным взаимодействием. Оптические и магнитные свойства таких плёнок зависят от толщины слоёв и их числа.

В М. п. возникают разл. виды *магнитной анизотропии*, которые существенно влияют на процессы перемагничивания тонкоплёночных образцов. Однонаправленная (обменная) анизотропия возникает в слоистых плёночных магнитных структурах на поверхности раздела ферромагнитной и антиферромагнитной плёнок. Механизм возникновения обменной анизотропии обусловлен наличием межслойного обменного взаимодействия между ферромагнитно упорядоченными спинами ферромагнитной плёнки и антиферромагнитно упорядоченными спинами антиферромагнитной плёнки, осуществляемого через границу раздела между плёнками. Однонаправленная анизотропия проявляется в возникновении смещённой петли магнитного гистерезиса. В тонких плёнках наблюдается также анизотропия типа лёгкая плоскость (все направления в плоскости плёнки эквивалентны). Однако при толщине меньше некоторой предельной величины знак константы анизотропии изменяется и возникает анизотропия типа лёгкая ось с осью анизотропии, перпендикулярной плоскости плёнки. Причина появления перпендикулярной магнитной анизотропии в ультратонких магнитных плёнках – доминирование над анизотропией формы др. механизмов анизотропии, а именно анизотропии Нееля и анизотропии поверхности раздела (поверхностной анизотропии). Процесс намагничивания тонких плёнок существенно зависит от направления, в котором приложено внешнее магнитное поле. Если к плёнке в процессе её формирования или последующей температурной обработки приложить внешнее магнитное поле, то в ней может возникнуть дополнит. текстура.

В М. п. существует особая доменная структура (см. *Магнитная доменная*

*структура*). В тонких плёнках, в отличие от объёмных материалов, реализуются не доменные стенки Блоха, а доменные стенки Нееля, в которых поворот вектора намагниченности происходит так, что его составляющая, нормальная к поверхности стенки, изменяется внутри стенки, т. е. магнитный момент при движении вдоль направления, перпендикулярного плоскости стенки, вращается в плоскости параллельной плоскости плёнки. Кроме того, в тонких М. п. возникает особый вид доменных стенок – «поперечные» доменные стенки, представляющие собой комбинацию стенок блоховского и неелевского типов. В тонких М. п. существует также особый тип доменов – *цилиндрические магнитные домены*.

М. п. получают разл. физич. и химич. способами. Наиболее известные методы получения М. п.: тепловое и лазерное испарение, молекулярно-лучевая *эпитаксия*, электронно-лучевое, катодное и высокочастотное распыление с последующей конденсацией пересыщенных паров осаждаемого материала на подложку из диэлектрика или металла. М. п., полученные при относительно низких темп-рах подложки, состоят из кристаллитов, размеры которых значительно меньше, чем у массивных образцов. В кон. 20 – нач. 21 вв. активно развиваются такие методы получения М. п., как электрохимич. осаждение, технология Ленгмюра – Блоджетт (см. *Ленгмюра – Блоджетт плёнки*), *золь-гель процессы*, полимерные и др. технологии, позволяющие создавать нанокompозитные, наноструктурированные и др. плёнки с уникальным сочетанием магнитных, электрич. и др. физич. свойств.

Совр. эксперим. методы исследования (сканирующая туннельная и атомно-силовая микроскопии и их разновидности просвечивающая электронная микроскопия высокого разрешения, методы магнитного резонанса, оптич. и магнитооптич. методы) делают возможным детальное изучение структурных, электронных и магнитных свойств М. п. Эти методы позволяют, в частности, с точностью до одного атома визуализировать кристаллич. структуру и направление магнитных моментов плёнки.

М. п. применяются в микроэлектронике, приборостроении, в системах записи и хранения информации. В нач. 21 в. особое внимание уделяется М. п., обладающим эффектом гигантского *магнитосопротивления*, и плёнкам сложного состава, включающим в себя, напр., магнитные и сегнетоэлектрич. слои или магнитные и полимерные слои. При этом напр., за счёт магнитострикционного удлинения магнитного слоя может появляться пьезоэлектрич. эффект в сегнетоэлектрич. слое или магнитокалорич. эффект в магнитном слое может вызвать фазовый переход из нерастворимой фазы в растворимую в полимерном слое.

Лит.: Казаков В. Г. Тонкие магнитные плёнки // Соросовский образовательный журнал