

THIN MAGNETIC FILMS

V. G. KAZAKOV

An article acquaints a reader with new class of magnetic materials, thin magnetic films that are widely used in microelectronics and computers. Specific structural and magnetic properties of these films are briefly described. This paper contains a physical foundation for understanding of information recording processes using thin films as a magnetic media in memory elements.

Статья знакомит с новым классом магнитных материалов – тонкими магнитными пленками, которые широко используются в микроэлектронике и вычислительной технике. Кратко описаны особенности структурного состояния и магнитных свойств пленок. Изложенный материал составляет физическую основу для понимания процессов записи и хранения информации при использовании пленок в качестве магнитной среды в запоминающих устройствах.

© Казаков В.Г., 1997

ТОНКИЕ МАГНИТНЫЕ ПЛЕНКИ

В. Г. КАЗАКОВ

Иркутский государственный педагогический университет

ВВЕДЕНИЕ

Принято считать, что тонкой магнитной пленкой называется слой магнитного материала толщиной от нескольких ангстрем (Å) до $10\,000\ \text{Å}$ ($1\ \text{Å} = 10^{-1}\ \text{нм}$). До настоящего времени эти образцы являются объектом интенсивных исследований в России и за рубежом (США, Япония, ФРГ, Англия, Франция и др.). Ежегодно результаты изучения физических свойств пленок обсуждаются на международных и российских конференциях. Описанию их кристаллической структуры и свойств посвящаются многочисленные статьи, обзоры, монографии [1–3]. Естественно возникает вопрос: чем же примечательны эти пленки? Почему к их исследованию проявляется такой интерес?

Прежде всего это связано с тем, что изучение физических свойств ферромагнитных пленок способствует решению фундаментальных проблем физики магнитных явлений, развитию теории ферромагнетизма. Исследование пленок позволяет получать новую и ценную информацию о магнитных свойствах ферромагнетиков, углублять наши знания по многим вопросам в области магнетизма. Например, изучение тонких пленок существенно расширило представления о физической природе анизотропии ферромагнетиков, позволило выявить и исследовать разнообразные процессы перемагничивания, обнаружить новые физические явления. Одно из таких явлений – гигантское магнитосопротивление, которое привлекло особенно большое внимание и в последние несколько лет стало предметом всестороннего исследования. Также очень важно, что в пленках можно реализовать структурные состояния, которые трудно или невозможно получить в обычных (массивных или объемных) магнитных образцах. Это существенно расширяет возможности исследования связи между структурными характеристиками и физическими свойствами магнитных материалов. Изучение физических свойств тонких ферромагнитных пленок также актуально с точки зрения их практического применения в микроэлектронике и вычислительной технике. Важнейшим применением пленок является их использование в качестве магнитной среды для записи и хранения информации в запоминающих устройствах (ЗУ). Магнитные пленки имеют особенности, благодаря которым их использование способствует повышению плотности записи информации и быстродействия ЗУ.

Запоминающие устройства должны обеспечивать надежное и длительное хранение информации,

малое время доступа, низкую стоимость хранения единицы информации, высокую плотность и скорость записи. Чтобы отвечать этим требованиям, пленки должны обладать вполне определенным набором структурных и магнитных характеристик. Получить такие пленки можно только зная механизмы формирования их свойств. Поэтому до настоящего времени не ослабевает интерес к исследованиям в этой области.

МЕТОДЫ ПОЛУЧЕНИЯ И ПРОЦЕССЫ ФОРМИРОВАНИЯ ТОНКИХ ПЛЕНОК

Что же представляет собой тонкая магнитная пленка? Как протекает процесс ее формирования? Каковы особенности ее свойств?

В настоящее время существуют такие методы получения тонких пленок:

- термическое испарение материала пленки в вакууме;
- катодное распыление;
- магнетронное распыление;
- ионно-плазменное распыление;
- электролитическое осаждение;
- молекулярно-лучевая эпитаксия с надежной аттестацией атомной и магнитной структуры.

Чтобы лучше понять специфику тонких пленок, рассмотрим один из методов их получения подробнее.

Метод термического испарения в вакууме

Этот метод заключается в испарении металла или сплава в вакууме и конденсации его паров на поверхности пластинки (подложки). Качество и прочность пленок в большей степени зависят от чистоты подложки. Поэтому поверхность подложки предварительно полируется и тщательно очищается. Часто во время напыления подложка нагревается при помощи специального нагревателя до температуры 100–300°С. При подогретой подложке частично снимаются внутренние напряжения в пленке и улучшается ее сцепление с подложкой. Подложки могут быть изготовлены из стекла, кварца, слюды и немагнитных металлов. В качестве подложки в некоторых случаях используются сколы монокристаллов поваренной соли NaCl. Простейшая схема установки для получения тонких магнитных пленок методом термического испарения металлов и сплавов в вакууме показана на рис. 1. Сплав или металл, который должен быть осажден на подложку 1, помещают в испаритель 2. В рассматриваемом случае он имеет форму лодочки, изготовленной из тугоплавкого металла, например вольфрама. Через лодочку пропускают электрический ток, пока она не приобретет достаточно высокую температуру, при

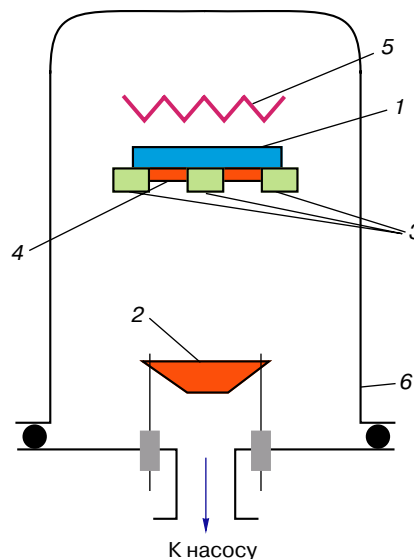


Рис. 1. Схема испарительной части вакуумной установки для получения пленок: 1 – подложка, 2 – лодочка с испаряемым сплавом, 3 – маска, 4 – пленка, 5 – нагреватель, 6 – корпус вакуумной камеры

которой исходный материал начинает плавиться. Пары от расплавленного металла в виде атомарного пучка, распространяясь от лодочки, попадают на подложку 1 и осаждаются на ее поверхности, образуя слой в виде тонкой пленки (вакуумного конденсата).

Если подложку предварительно поместить на пластинку (маску) с отверстиями 3, например круглыми, то в процессе конденсации на подложке образуются пленки, имеющие форму в виде круглых пятен, то есть в соответствии с формой отверстий в маске. Таким образом, с помощью маски 3 можно придавать пленкам различные размеры и форму.

Вся система помещается в вакуумную камеру 6, откачанную до достаточно высокого вакуума. Вакуум должен быть таким, чтобы атомы металла не сталкивались с молекулами остаточного газа при своем движении к подложке, то есть их траектории должны быть прямолинейными. Это условие выполняется, если в камере создается давление порядка 10^{-5} мм ртутного столба. В этом случае расстояние от испарителя до подложки достаточно мало по сравнению со средней длиной свободного пробега молекул газа и большая часть атомов металла будет достигать подложки, не испытывая столкновений с молекулами остаточного газа. Такой вакуум легко получить в обычной лабораторной вакуумной установке. При осаждении паров на подложку происходит переход атомов металла из паровой фазы в конденсированное состояние.

Рассмотренный метод позволяет получать пленки разной толщины. Она регулируется изменением скорости или времени конденсации. На процесс формирования пленок оказывают влияние несколько факторов, наиболее существенным из которых является температура подложки. В зависимости от этой температуры могут реализоваться различные механизмы конденсации, которые в большой степени определяют структурное состояние и магнитные свойства пленок. В частности, при повышении температуры подложки от 200 до 500°C наблюдается заметное изменение магнитной проницаемости и величины внешнего магнитного поля H_s , в котором происходит насыщение ферромагнитной среды. Не анализируя каждый механизм в отдельности, рассмотрим один из них, например механизм конденсации пар \rightarrow жидкость \rightarrow кристалл, который осуществляется, когда температура подложки выше определенной критической.

Применение электронной микроскопии позволило установить, что при конденсации паров сначала образуются капли жидкой конденсированной фазы, которые на некоторой стадии роста кристаллизуются, образуя отдельные изолированные частицы (зародыши), имеющие в большинстве случаев сферическую форму [4]. Затем в процессе дальнейшей конденсации паров происходит рост зародышей, их слияние и образование сплошного слоя.

ОСОБЕННОСТИ КРИСТАЛЛИЧЕСКОЙ СТРУКТУРЫ ТОНКИХ ПЛЕНОК

Различные причины определяют магнитные свойства пленок. Особенно большую роль играет кристаллическая структура. Поэтому, установив особенности структуры тонких пленок и закономерности ее влияния на формирование их свойств, можно существенно улучшить физико-технические параметры пленочных материалов и получать образцы с заданными свойствами.

Подложки, на которых конденсируются пленки, обычно имеют температуру 100–300°C. Это существенно ниже температуры кристаллизации массивных магнитных сплавов. В результате пленки формируются в условиях заметного переохлаждения [4]. В итоге структура пленок, сконденсированных в вакууме, имеет свою специфику. Для структуры вакуумных конденсатов характерны следующие особенности.

Пленки, полученные при относительно низких температурах подложки, состоят из кристаллов, размеры которых заметно меньше, чем у массивных образцов (их размер у конденсатов составляет 10^{-9} – 10^{-8} м). Охлаждая подложку до достаточно низкой температуры, можно получить вакуумные конденсаты в аморфном состоянии (аморфные пленки).

Из-за больших переохлаждений и перенасыщенный процесс формирования пленок сопровождается образованием высокой концентрации несовершенств кристаллической решетки, например возникновением вакансий. Это проявляется в перемещении атомов из узлов кристаллической решетки к межузельным положениям. Возникают свободные узлы решетки (вакансии) и межузельные (смещенные) атомы. Микродефекты структуры имеют место и в массивных металлах и сплавах, но в значительно меньшем количестве [4]. Благодаря условиям, при которых происходит зарождение и формирование пленок, в них возникают макро- и микронапряжения и деформации. Уровень напряжений иногда значительно превышает предел прочности материала в массивном состоянии.

Рассмотренные особенности структуры пленок отражают неравновесность состояний, в которых находятся пленки после их получения. Неравновесность состояния пленок также может проявляться в образовании метастабильной фазы, например термодинамически неравновесной аморфной фазы. На степень неравновесности пленок большое влияние оказывают физико-технологические параметры (температура подложки, скорость конденсации, степень вакуума, физическая природа испаряемого материала и др.). В пленках образуется огромное число различных неравновесных состояний, которым соответствуют определенные магнитные свойства. При нагревании пленок, а также при комнатной температуре наблюдается изменение их структурного состояния. Происходят укрупнение кристаллитов, уменьшение микро- и микронапряжений, протекают фазовые превращения. Примером этого является переход термодинамически неравновесного аморфного состояния в кристаллическое. Также обнаруживается изменение концентрации вакансий и т.п. В результате пленки переходят в более равновесное состояние.

Структура и физические свойства пленок помимо указанных причин в большой степени зависят также от толщины пленок. При уменьшении толщины пленок возрастает вклад поверхностных процессов по сравнению с объемными. В пленках с толщиной меньше некоторой критической в результате увеличения вклада поверхностной энергии изменяются фазовые и структурные состояния, электросопротивление и другие физические свойства. Особенности структуры и толщина тонких пленок, естественно, оказывают существенное влияние на их магнитные свойства.

МАГНИТНЫЙ МОМЕНТ И НАМАГНИЧЕННОСТЬ

Раскроем физический смысл некоторых параметров, характеризующих магнитное состояние вещества. Согласно модели атома Резерфорда–Бора, электрон движется по одной из круговых орбит

вокруг атомного ядра с частотой ν . Тогда его движение можно уподобить круговому току I :

$$I = e\nu, \quad (1)$$

где e – заряд электрона. При появлении электрического тока в окружающем пространстве возникает магнитное поле. Величина, равная

$$p = \mu_0 IS = \mu_0 e\nu S, \quad (2)$$

называется орбитальным магнитным моментом электрона; μ_0 – магнитная постоянная, S – площадь контура, обтекаемого током. Магнитный момент – векторная величина. Его направление совпадает с направлением положительной нормали к контуру с током.

Кроме орбитального момента импульса электрон обладает также собственным моментом импульса (спином). Соответственно электрон имеет и собственный (спиновый) магнитный момент. Результирующий магнитный момент атома является векторной суммой всех орбитальных и спиновых моментов.

Поскольку электрон имеет два магнитных момента, важно установить, какой из них определяет магнитные свойства ферромагнетиков. Специально проведенные опыты показали, что в металлах группы железа (Fe, Ni, Co) основной вклад в магнитный момент атома вносят спиновые магнитные моменты. Атомы этих металлов имеют незаполненные электронные d -оболочки. В этих оболочках число электронов со спинами одного направления не равно числу электронов, имеющих спины, направленные антипараллельно. В результате в d -оболочках часть спиновых магнитных моментов остается некомпенсированной [5]. Их векторная сумма и определяет магнитный момент атома.

Остается рассмотреть причины, определяющие одно из основных свойств ферромагнетиков – их способность сильно намагничиваться в относительно слабых магнитных полях. В ферромагнитных металлах между d -электронами соседних атомов существует квантовое электростатическое взаимодействие, благодаря которому спиновые магнитные моменты электронов ориентируются параллельно друг другу. Квантовомеханические расчеты показывают, что в этом случае состояние системы электронов является энергетически выгодным. Силы взаимодействия между электронами, имеющие квантовую природу, называются обменными силами. Такое название они получили потому, что в процессе взаимодействия d -электроны соседних атомов как бы обмениваются местами [5]. Эти силы поддерживают параллельность спиновых магнитных моментов в отдельных малых областях ферромагнетика. Поэтому каждая область является намагниченной до насыщения и имеет определенный результирующий магнитный момент. Магнитный момент единицы

объема ферромагнетика называется намагниченностью. Намагниченность, как и магнитный момент, является векторной величиной (M). Так как рассмотренные области намагничиваются до насыщения без участия внешнего магнитного поля, они называются областями самопроизвольной намагниченности или доменами. В ненамагниченном состоянии ферромагнетик бывает разбит на множество доменов, имеющих различную ориентацию намагниченности. Поэтому результирующий магнитный момент всего магнитного образца может быть равен нулю.

При помещении ненамагниченного ферромагнетика во внешнее магнитное поле магнитные моменты доменов начинают ориентироваться в направлении этого поля. Ферромагнетик в целом приобретает магнитный момент, равный векторной сумме магнитных моментов всех доменов. Происходит намагничивание образца. При возрастании внешнего магнитного поля процесс будет продолжаться, пока весь объем ферромагнетика не превратится в один большой домен. Поскольку области самопроизвольной намагниченности являются намагниченными еще до действия внешнего магнитного поля, намагничивание ферромагнетика происходит в относительно слабых магнитных полях. Когда векторы намагниченности всех доменов приобретают направление, совпадающее с ориентацией внешнего магнитного поля, наступает так называемое техническое насыщение. Магнитное поле, при котором достигается это состояние, называется полем насыщения H_s , а намагниченность, соответствующая этому состоянию, – намагниченностью насыщения M_s .

МАГНИТНЫЕ СВОЙСТВА ТОНКИХ ПЛЕНОК

Магнитная анизотропия

Известно большое число различных ферромагнитных материалов, используемых в технике. Ограничимся рассмотрением поликристаллических пленок, полученных из хорошо известных ферромагнетиков (железо, никель, кобальт) и их сплавов. Как уже отмечалось, физические свойства вещества в виде пленки могут существенно отличаться от свойств этого вещества в обычном (массивном) состоянии. Рассмотрим некоторые особенности тонких магнитных пленок и причины, которые их обуславливают.

Прежде всего следует отметить, что пленки можно рассматривать как образцы, обладающие двумерной геометрией, то есть малым отношением толщины пленки d к ее линейным размерам. Например, если диаметр круглой пленки $D = 1$ мм, а толщина $d = 100$ нм (10^{-4} мм), то отношение $d/D = 10^{-4}$. При такой геометрической форме образца энергетически выгодным становится состояние пленки, при

котором векторы намагниченности при отсутствии внешнего магнитного поля лежат в плоскости пленки. Благодаря этому для намагничивания пленки в ее плоскости необходимо приложить магнитное поле, значение напряженности которого значительно меньше, чем для случая, когда пленка намагничивается по нормали к ее плоскости. То есть процесс намагничивания тонких пленок существенно зависит от направления, в котором приложено внешнее магнитное поле.

Таким образом, специфика геометрической формы пленок приводит к образованию анизотропии формы. При этом все направления в плоскости пленок эквивалентны (пленка обладает плоскостной магнитной анизотропией). Такая особенность пленок играет большую роль при их использовании в качестве среды для продольной магнитной записи в ЗУ. Пленка играет роль рабочего слоя носителя магнитной записи (например, в магнитном диске).

В пленках наряду с анизотропией формы существуют и другие виды анизотропии, создание которых обусловлено рядом причин. Если к пленке в процессе ее формирования приложить магнитное поле, то в ней возникает одноосная магнитная анизотропия. В плоскости поликристаллической пленки, например имеющей форму круглого пятна, становится энергетически выгодной не любая ориентация векторов намагниченности, а только такая, при которой намагниченность пленки направлена вдоль одного преимущественного направления. Ось, совпадающая с этим направлением, называется осью легкого намагничивания (ОЛН). При этом векторы намагниченности \mathbf{M} могут ориентироваться вдоль ОЛН как в одном, так и в противоположном направлении. Оба эти направления являются одинаково устойчивыми. ОЛН, как правило, совпадает с направлением намагниченности пленки, которое определяется ориентацией внешнего магнитного поля, приложенного в процессе формирования пленки. На анизотропию влияют различные факторы: кристаллическая структура пленки, упругие напряжения, преимущественная ориентация пар атомов определенного сорта в сплаве, например пар атомов железа в железоникелевом сплаве.

При отклонении магнитного момента намагниченной пленки от ОЛН ее энергия возрастает. Изменение энергии E пленки при отклонении намагниченности от ОЛН

$$E = VK_u \sin \varphi, \quad (3)$$

где E – энергия анизотропии, K_u – среднее значение константы анизотропии, φ – угол между направлением намагниченности и ОЛН, V – объем пленки.

Ось, перпендикулярная ОЛН ($\varphi = 90^\circ$), называется осью трудного намагничивания (ОТН). При ориентации векторов намагниченности вдоль ОТН,

как видно из (3), энергия одноосной анизотропии максимальна.

Анизотропия является важнейшим свойством ферромагнитных материалов и оказывает существенное влияние на процессы перемагничивания, коэрцитивную силу и другие физические характеристики пленок. В пленках при некоторых условиях (наличие ориентированных упругих напряжений, столбчатой структуры и др.) может сформироваться ОЛН, направленная перпендикулярно к ее плоскости. Анизотропия таких пленок называется перпендикулярной. Пленки с перпендикулярной анизотропией могут использоваться в запоминающих устройствах с вертикальным способом записи. В этом случае локальные участки пленки, выполняющей роль рабочего слоя магнитного носителя, перемагничиваются не в ее плоскости, а в направлении, перпендикулярном к поверхности носителя. Последовательность таких локальных участков малого размера представляет записанную цифровую информацию. Ориентация намагниченности по нормали к плоскости пленки обеспечивает малые размеры перемагниченных участков и, следовательно, высокую информационную емкость магнитных носителей. Таким образом, в пленках могут возникнуть различные виды анизотропии, которые существенно влияют на процессы перемагничивания тонкопленочных образцов.

Доменная структура тонких ферромагнитных пленок

Ферромагнитные образцы состоят из большого числа намагниченных до насыщения областей, векторы намагниченности в которых направлены в разные стороны. Если векторы намагниченности доменов ориентированы хаотически, то их векторная сумма будет равна нулю. Это состояние образца называется размагниченным. Такой ферромагнетик при отсутствии внешнего магнитного поля будет казаться ненамагниченным, хотя отдельные области самопроизвольной намагниченности сохраняются. При переходе от одного домена к соседнему происходит изменение направления намагниченности. Оно осуществляется не скачком, а постепенно, в пределах некоторого промежуточного слоя определенной ширины. Слой между соседними доменами называется доменной границей (ДГ) или стенкой. В зависимости от толщины пленок в них встречаются разные типы ДГ. На рис. 2 показано распределение векторов намагниченности в границах, которые наблюдаются в пленках толщиной более 100 нм и массивных монокристаллах, где имеются антипараллельные домены. Такая модель границы была предложена Блохом. В блоховской границе происходит постепенный поворот векторов \mathbf{M} в плоскостях, параллельных плоскости доменной границы, пока направление намагниченности не изменится на противоположное. При этом в доменной

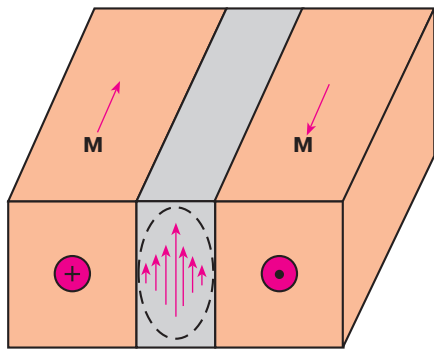


Рис. 2. Распределение векторов намагниченности в блоховской доменной границе. Стрелки изображают векторные проекции векторов \mathbf{M} на плоскость, перпендикулярную ОЛН пленки

границе возникают отличные от нуля проекции \mathbf{M} на нормаль к плоскости пленки (рис. 2). В центральной части ДГ вектор \mathbf{M} оказывается направленным перпендикулярно к поверхности пленки. В результате на пересечении ДГ с поверхностью пленки возникают магнитные поля.

При уменьшении толщины пленок энергия этих полей, а соответственно и полная энергия блоховских границ возрастает. Поэтому в тонких пленках существование блоховских доменных границ энергетически невыгодно [6]. Неель показал, что в пленках толщиной ниже определенной энергетически выгодна ДГ, в которой поворот векторов \mathbf{M} при переходе от одного домена к другому происходит в плоскости пленки. То есть перпендикулярная к поверхности пленки компонента намагниченности остается равной нулю. Доменная граница такого типа называется неелевской. Таким образом, для толстых пленок устойчивой является граница Блоха, а для тонких пленок, например толщиной менее 20 нм, — граница Нееля. При экспериментальном исследовании тонких пленок помимо рассмотренных двух типов доменных границ обнаружены ДГ, в которых чередуются элементы блоховских и неелевских границ. ДГ этого переходного типа получили название границ с перевязками. Границы с перевязками встречаются в интервале промежуточных толщин, где оба крайних случая энергетически эквивалентны. Этот интервал зависит от свойств пленок и приблизительно составляет 30–120 нм. Границы с перевязками иногда называют границами типа колючей проволоки.

Рассмотрим причины образования доменов в ферромагнетиках. Пусть имеется анизотропный ферромагнитный образец, намагниченный вдоль ОЛН (рис. 3, а). В этом состоянии он представляет собой постоянный магнит с двумя полюсами и является источником магнитного поля в окружающем пространстве. Это поле обладает достаточно боль-

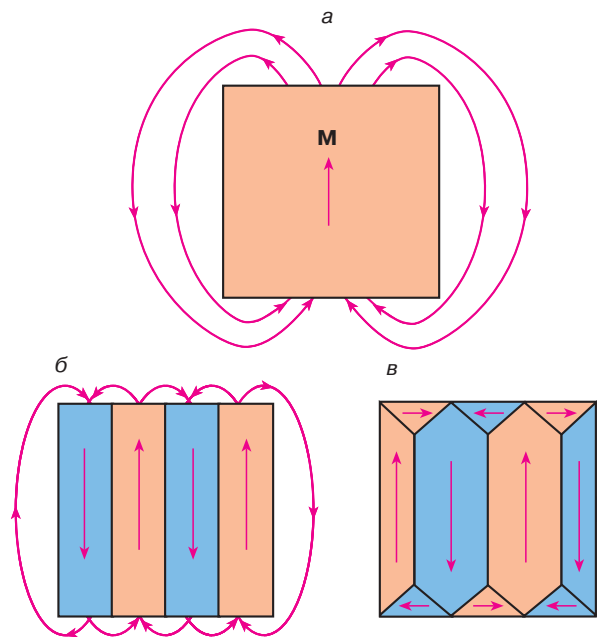


Рис. 3. Графическое изображение магнитного поля ферромагнитного образца: а – образец находится в однодоменном состоянии; б – ферромагнетик разбит на домены с противоположным направлением векторов намагниченности; в – доменную структуру ферромагнетика составляют антипараллельные и замыкающие домены

шой энергией. Значит, намагниченное состояние образца является энергетически невыгодным. Поэтому система образец–магнитостатическое поле стремится перейти в состояние с меньшей энергией. Это может осуществиться, если образец разбить на отдельные домены (рис. 3, б). В соседних доменах векторы намагниченности будут иметь противоположные направления, так что в целом тело окажется размагниченным.

В этом случае магнитные потоки соседних доменов замыкаются. В результате магнитное поле убывает при удалении от поверхности образца быстрее, чем в случае, показанном на рис. 3, а, и энергия магнитного поля оказывается меньше [7]. Ферромагнетик переходит в более устойчивое состояние. Энергия магнитного поля пропорциональна ширине доменов [8]:

$$E_m = M_s^2 b S, \quad (4)$$

где E_m – энергия магнитного поля ферромагнетика, M_s – намагниченность насыщения, b – ширина домена, S – площадь поверхности, перпендикулярной ОЛН образца. Как следует из (4), чем уже домен, тем меньше энергия ферромагнетика, то есть разбиение ферромагнетика на большее число доменов энергетически выгодно. Однако процесс деления на домены не может продолжаться беспрестанно, так

как при этом возрастает число доменных границ, а следовательно, увеличивается их полная энергия E_f . Поэтому ферромагнетик разбивается на такое число доменов, при котором сумма двух энергий E_m и E_f минимальна.

Еще более энергетически выгодным оказывается состояние ферромагнетика, если в нем помимо продольных доменов образуются домены с намагниченностью, направленной параллельно поверхности. Эти домены называются замыкающими. При такой доменной структуре магнитный поток замыкается внутри ферромагнетика, не выходя наружу (рис. 3, в). Исключается появление магнитных полюсов, и энергия магнитоэстатического поля практически становится равной нулю. Доменная структура вида рис. 3, в теоретически была рассчитана Л.Д. Ландау и Е.М. Лифшицем.

Существование доменов доказано многочисленными опытами. Для выявления и исследования доменной структуры (ДС) используют различные методы (метод порошковых фигур, магнитооптический, электронно-микроскопический и др.). При использовании порошкового метода на полированную поверхность образца наносят пипеткой 1–2 капли водной суспензии, содержащей мелкие ферромагнитные взвешенные частицы. Затем сверху помещают покровное стекло и изучают выявленную картину в микроскопе. В тех местах, где векторы намагниченности в границе направлены под углом к поверхности ферромагнетика, возникают магнитные поля (поля рассеяния). Взвешенные частицы, свободно перемещающиеся в жидкости, притягиваются этими полями и собираются над доменными границами, придавая им вид узких темных линий. Эти линии хорошо наблюдаются в оптическом микроскопе. На рис. 4 показана доменная

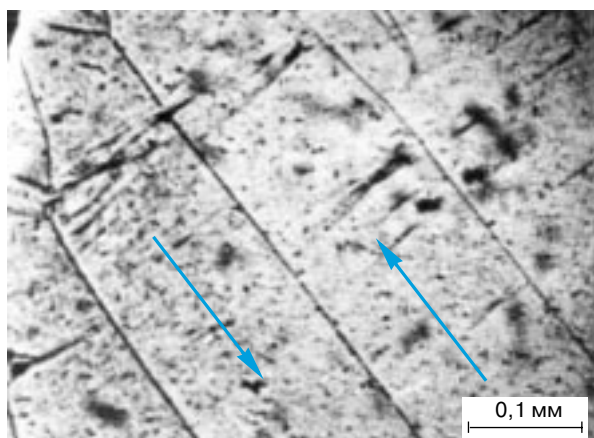


Рис. 4. Доменная структура железоникелевой пленки, выявленная порошковым методом. Толщина пленки 800 нм

структура железоникелевой пленки толщиной 800 нм. Предварительно пленка размагничивалась при помощи переменного магнитного поля с плавно убывающей до нуля амплитудой. На снимке хорошо видны относительно прямые блоховские доменные границы. Области между доменными границами являются доменами. Они имеют вид полос, ориентированных вдоль ОЛН. Векторы намагниченности в соседних доменах имеют антипараллельные направления. При внесении пленки в магнитное поле она намагничивается и переходит в однодоменное состояние.

Доменная структура пленки меньшей толщины ($d = 50$ нм), выявленная электронно-микроскопическим методом, показана на рис. 5. Доменная гра-

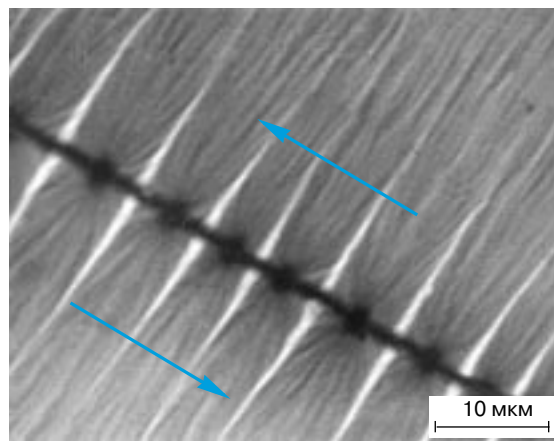


Рис. 5. Изображение доменной границы с поперечными связями, полученное в электронном микроскопе. Толщина пленки 50 нм

ница видна в виде черной линии, разделяющей два домена с антипараллельным направлением намагниченности. В отличие от предыдущей пленки на этом образце наблюдаются ДГ другого типа. На темной границе заметно выделяются короткие линии белого цвета. Так выглядит изображение доменной границы с перевязками, полученное в электронном микроскопе. При использовании магнитооптического метода в отличие от предыдущих рисунков наблюдаются не доменные границы, а сами домены в виде темных и светлых полос.

В последнее время получил развитие метод интерференционной электронной микроскопии, который позволяет непосредственно наблюдать картину распределения спонтанной намагниченности в ферромагнитном образце.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В статье приведены общие сведения о тонких магнитных пленках. Рассмотрены способы получения

пленок, механизм их формирования и особенности структуры. Описываются различные факторы, влияющие на магнитные характеристики пленок, учитывая которые можно направленно изменять их свойства. При изложении материала принималась во внимание его связь с различными разделами курса физики средней школы.

В настоящее время в школах России идет интенсивное внедрение вычислительной техники в учебный процесс. Учащиеся изучают методы накопления, передачи и обработки информации при помощи электронно-вычислительных машин (ЭВМ), применяют компьютеры для решения разнообразных задач. Между тем, рассказывая учащимся о работе ЭВМ, учителя не всегда имеют достаточно полное представление о физических принципах записи, хранения и считывания информации. В последнее время в качестве запоминающей среды в запоминающих устройствах, а также в магнитных головках стали применяться магнитные пленки — объект мало знакомый учителям. В связи с этим автор счел целесообразным подготовить статью по теме “Магнитные пленки и их свойства”.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Василевский Ю.А.* Носители магнитной записи. М.: Искусство, 1989.
2. *Карпенков С.Х.* Тонкопленочные магнитные преобразователи для внешних запоминающих устройств. В сб.: Устройства машинной памяти. М.: Знание, 1986. С. 34 (Радиоэлектроника и связь; №6).
3. *Кронмюллер Х.* // Магнетизм и магнит. материалы. 1995. Т. 140/144. С. 25 (Амстердам, Голландия).
4. *Палатник Л.С. и др.* Механизмы образования и структура конденсированных пленок. М.: Наука, 1972.
5. *Белов К.П.* Упругие, тепловые и электрические явления в ферромагнетиках. М.: ТТЛ, 1957.
6. *Праттон М.* Тонкие ферромагнитные пленки /Под ред. О.Е. Брянской, Н.Н. Калинина. Л.: Судостроение, 1967.
7. *Каганов М.И., Цукерник В.М.* Природа магнетизма. М.: Наука, 1982.
8. *Тикадзуми С.* Физика ферромагнетизма / Под ред. Р.В. Писарева. М.: Мир, 1987.

* * *

Владилен Георгиевич Казаков, доктор физико-математических наук, профессор. Читает общий курс физики и спецкурс “Магнетизм” студентам физического факультета Иркутского государственного педагогического университета. Область научных интересов: физика тонких магнитных пленок, практическое применение пленок в микроэлектронике и вычислительной технике. Основные исследования связаны с выявлением закономерностей влияния атомно-кристаллической структуры, магнитоупругих и магнитостатических взаимодействий на магнитные свойства и процессы перемагничивания тонких ферромагнитных пленок. Автор 189 научных работ и семи изобретений.