

## Магнитные плёнки

**Магнитные плёнки**, слои материала толщиной от долей нанометра до нескольких десятков микрометров, обладающие магнитными свойствами. В магнитных плёнках обнаружены особые физические свойства, не наблюдающиеся в объёмных образцах. Существенное влияние на физические свойства магнитных плёнок оказывает высокая концентрация дефектов в их кристаллической структуре (само наличие поверхности у плёнки представляет собой нарушение симметрии кристаллической решётки). Дефекты и неоднородности характерны для плёнок ещё и потому, что условия образования как эпитаксиальных (с монокристаллической структурой), так и поликристаллических плёнок далеки от равновесных. Это позволяет атомам перемещаться из узлов кристаллической решётки в межузловые положения. Возможность такого перемещения характеризует неравновесное состояние решётки, которое зависит от таких физико-технологических параметров как степень вакуума, температура и структурные параметры подложки, скорости осаждения и др. Наличие в магнитных плёнках большого количества неравновесных состояний влияет на их магнитные свойства. Для приведения плёнки в равновесное состояние необходима последующая термообработка. Структура и физические свойства плёнок также зависят от толщины плёнки; при её уменьшении возрастает вклад поверхностных эффектов по сравнению с объёмными.

### Свойства тонких магнитных плёнок

Наибольший практический интерес представляют тонкие (толщиной менее 1 мкм) магнитные плёнки. Их свойства определяются в первую очередь эффектами, связанными с малой толщиной (размерные эффекты). Это зависимости температуры магнитных фазовых переходов, спонтанной намагниченности и магнитной анизотропии от толщины плёнки.

Другим важнейшим фактором, приводящим к существенному отличию свойств тонких магнитных плёнок от объёмных материалов, является возникновение в них значительных механических напряжений, вызванных рассогласованием параметров кристаллической решётки плёнки и подложки. Величины относительных деформаций в тонких эпитаксиальных плёнках составляют несколько процентов, что не достижимо в объёмных материалах, разрушающихся при величине относительной деформации порядка 0,1%. Это позволяет осуществлять деформационную инженерию (англ. strain engineering) материалов с заданными магнитными свойствами и спиновыми структурами; например, изменение с помощью эпитаксиальных напряжений в эквиатомном сплаве железо – родий температуры фазового перехода из антиферромагнитного в ферромагнитное состояние или деформационная

инженерия спиновых циклоидальных структур в сегнетомагнетике – феррите висмута.

Тонкие плёнки подразделяют на три типа. В первом – толщина порядка 100 нм и более (предел толстой плёнки) – при возрастании толщины свойства плёнки стремятся к свойствам объёмного материала. В промежуточном типе (толщина от одного до нескольких десятков нанометров) плёнки (например, эпитаксиальные плёнки) более или менее однородно напряжены, а влияние границы раздела с подложкой ещё сравнительно невелико. В ультратонкой плёнке (толщиной менее 1 нм) влияние межфазных границ крайне велико и свойства плёнки в значительной степени определяются геометрией линии раздела с подложкой.

Магнитные свойства этих трёх типов плёнок существенно различаются. Так, в ультратонких плёнках для зависимости намагниченности от температуры наблюдается переход от закона Блоха (выполняющегося для толстых ферромагнитных плёнок) к почти линейному спаду намагниченности с температурой. Сильная зависимость магнитных свойств от толщины обнаружена в плёнках сплава железо – родий: размерные эффекты начинают сказываться при толщинах плёнки, меньших 20 нм, приводя к быстрому уменьшению температуры перехода – с каждым нанометром на 10 К. Предельный случай двумерной магнитной плёнки реализован в виде мономолекулярных слоёв магнитных кристаллов (иодид хрома  $\text{CrI}_3$ , гематен  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ); сильная одноосная магнитная анизотропия позволяет реализовать магнитное упорядочение по модели Изинга и обойти запрет Мермина – Вагнера на магнитное упорядочение в двумерной решётке атомов при температуре, отличной от 0 К.

Влияние подложки на магнитные свойства плёнки не сводится только к механическому воздействию. Оно также может модифицировать обменное взаимодействие и тип магнитных структур, наблюдающихся в магнитных плёнках. Косвенное обменное взаимодействие атомов ультратонких эпитаксиальных плёнок (монослоёв) магнитных металлов (Fe, Co) через атомы подложки из тяжёлых металлов (Pt, Ir), обладающих сильным спин-орбитальным взаимодействием, приводит к стабилизации спиновых циклоид или скирмионов за счёт взаимодействия Дзялошинского – Мория.

К магнитным относятся также плёнки, полученные чередованием множества слоёв магнитоупорядоченных и магнитонеупорядоченных материалов. В таких мультислоистых 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 магнитных плёнках возникают различные виды магнитной анизотропии, которые существенно влияют на процессы перемангничивания 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 спинами ферромагнитной и антиферромагнитной плёнок, 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 плёнки, меньшей 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 других 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 дополнительная текстура.

В магнитных плёнках существует особая магнитная доменная структура. В тонких плёнках, в отличие от объёмных материалов, энергетически выгодными оказываются не доменные стенки Блоха, а стенки Нееля. Кроме того, в тонких магнитных плёнках возникает особый смешанный тип доменных стенок, представляющих собой комбинацию стенок блоховского и неелевского типов. В тонких магнитных плёнках существуют также особые типы аксиально симметричных микромагнитных структур – цилиндрические магнитные домены и скирмионы.

### **Методы получения и исследования магнитных плёнок**

Магнитные плёнки получают различными физическими и химическими способами. Наиболее известные методы получения магнитных плёнок: 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. Магнитные плёнки, полученные при относительно низких температурах подложки, состоят из кристаллитов, размеры которых значительно меньше, чем у массивных образцов. В конце 20 – начале 21 вв. активно развиваются такие методы получения магнитных плёнок, как электрохимическое осаждение, технология Ленгмюра – Блоджетт, золь-гель процессы, микромеханическая и жидкофазная эксфолиация (отслаивание двумерных мономолекулярных слоёв), полимерные и другие технологии, позволяющие создавать нанокompозитные, наноструктурированные и другие плёнки с уникальным сочетанием магнитных, электрических и других физических свойств.

Детальное изучение структурных, электронных и магнитных свойств магнитных плёнок стало возможным благодаря современным экспериментальным методам исследования: сканирующей зондовой микроскопии (включая её специфические магнитные виды: спин-

поляризованную сканирующую туннельную, магнитно-силовую, магнитно-резонансную силовую микроскопии, а также односпиновую магнитометрию на основе NV-центра – азото-замещённой вакансии в алмазном зонде), просвечивающей электронной микроскопии высокого разрешения, методам магнитного резонанса, оптическим и магнитооптическим методам. Эти методы позволяют, в частности, с точностью до одного атома визуализировать кристаллическую структуру и направление магнитных моментов плёнки.

### Применение магнитных плёнок

Магнитные плёнки применяют в микроэлектронике, приборостроении, системах записи и хранения информации, спинтронике и магنونике (в последней так же, как и в спинтронике, используются процессы переноса магнитного момента, но без зарядового транспорта, а с помощью спиновых волн). В средах магнитной записи плёнки имеют сложную многослойную структуру, в которой каждый слой выполняет определённую функцию (рис. 1).

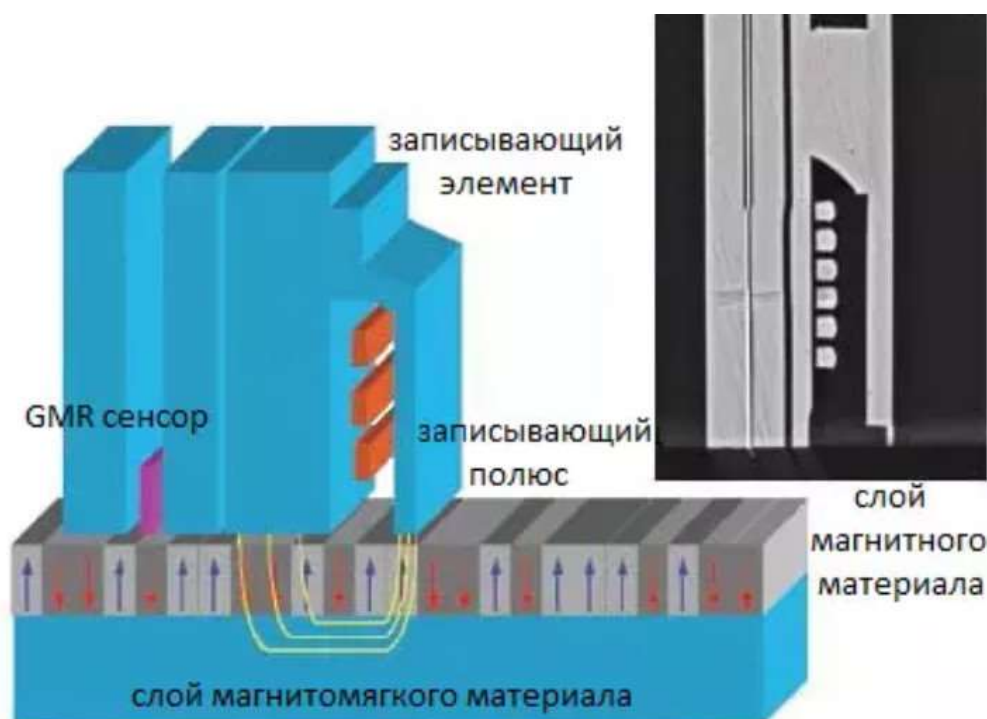
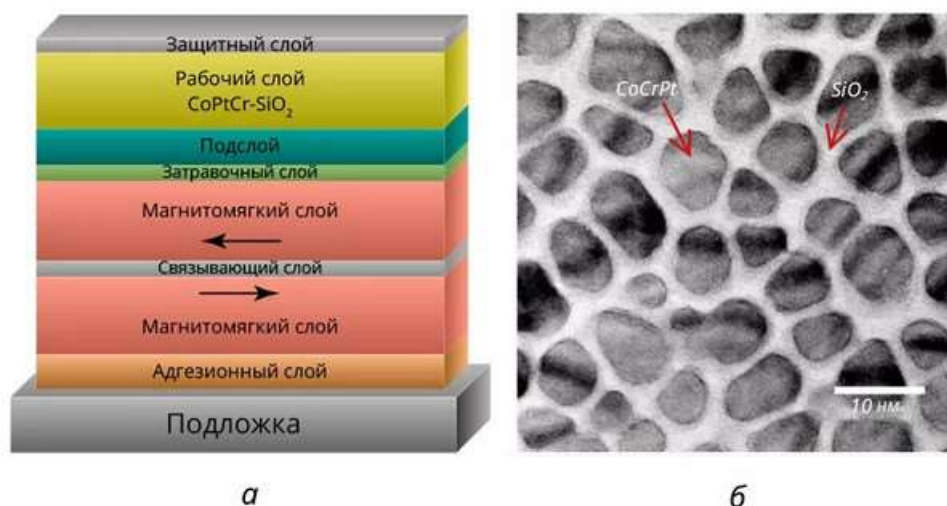


Рис. 1. Микрофотография и схема структуры головки записи/считывания для перпендикулярной записи, при которой вектор намагниченности в области, соответствующей биту информации, перпендикулярен плоскости носителя записи.

В начале 21 в. особое внимание уделяется многослойным структурам на основе магнитных плёнок, обладающих эффектом гигантского магнитосопротивления (П. Грюнберг, А. Ферт, Нобелевская премия, 2007). В настоящее время эффект используется в качестве принципа действия спиновых клапанов (GMR-сенсоров) жёстких дисков компьютеров для считывания информации (рис. 2).



*а* – послойная структура среды записи: рабочий слой из гранул магнитного сплава CoPtCr в матрице оксида кремния SiO<sub>2</sub>. Ниже расположены: подслоя для выравнивания параметров решётки многослойной структуры; затравочный слой для задания параметров решётки; магнитопровод для замыкания поля из двух слоёв магнитомягкого материала, обменно-связанных посредством слоя из антиферромагнетика; и адгезионный слой, обеспечивающий сцепление с подложкой. *б* – микрофотография поверхности рабочего слоя: зёрна CoPtCr (кристаллиты) изолированы друг от друга диэлектриком SiO<sub>2</sub>, их ось анизотропии перпендикулярна плоскости плёнки.

Рис. 2. Тонкоплёночные многослойные структуры, используемые в магнитной записи. Иллюстрация (а): Архив БРЭ. Фото (б): Kaitsu I., Inamura R., Toda J., Morita T. Ultra high density perpendicular magnetic recording technologies // Fujitsu Scientific and Technical Journal. 2006, Vol. 42, N. 1. P. 122–130.

Также большим потенциалом практического использования обладают плёнки сложного состава, включающие в себя магнитные и сегнетоэлектрические слои или магнитные и полимерные слои. При этом за счёт механической или термодинамической связи компонент возникают производные физические эффекты, например магнитострикционное удлинение магнитного слоя вызывает в механически связанном с ним сегнетоэлектрическом слое пьезоэлектрический эффект, а магнитокалорический эффект или магнитотепловой эффект (нагрев в переменном магнитном поле) вызывает в полимерном слое, находящемся в тепловом контакте с магнитным слоем, фазовый переход из нерастворимой фазы в растворимую.

Тишин Александр Метталинович, Пятаков Александр Павлович

## Библиография

- Mermin N. D. Absence of ferromagnetism or antiferromagnetism in one- or two-dimensional isotropic Heisenberg models / N. D. Mermin, H. Wagner // Physical Review Letters. – 1966. – Vol. 17, № 22. – P. 1133–1136.
- Малоземов А. Доменные стенки в материалах с цилиндрическими магнитными доменами / А. Малоземов, Д. Слонзуски ; пер. с англ. В. В. Волкова, С. А. Кижаяева. – Москва : Мир, 1982.

- Яминский И. В. Магнитная силовая микроскопия поверхности / И. В. Яминский, А. М. Тишин // Успехи химии. – 1999. – Т. 68, № 3. – С. 187–193.
- Магноника – новое направление спинтроники и спин-волновой электроники / С. А. Никитов, Д. В. Калябин, И. В. Лисенков [и др.]. // Успехи физических наук. – 2015. – Т. 185, № 10. – С. 1099–1128.
- Стрейтроника – новое направление микро- и наноэлектроники и науки о материалах / А. А. Бухараев, А. К. Звездин, А. П. Пятаков, Ю. К. Фетисов // Успехи физических наук. – 2018. – Т. 188, № 12. – С. 1288–1330.
- Feng Z. X. Electric-field control of magnetic order: from FeRh to topological antiferromagnetic spintronics / Z. X. Feng, H. Yan, Z. Q. Liu // Advanced Electronic Materials. – 2018. – Vol. 5, № 1. – P. 1800466.