13

Влияние ионного и кислотного травления на структурные и магниторезонансные характеристики эпитаксиальных пленок феррит-гранатов

© А.А. Сыров, С.В. Томилин, Е.Ю. Семук, С.В. Османов

Крымский федеральный университет им. В.И. Вернадского,
295007 Симферополь, Россия
e-mail: anatoly199824@rambler.ru

Поступило в Редакцию 29 октября 2024 г.
В окончательной редакции 20 марта 2025 г.
Принято к публикации 03 апреля 2025 г.

Представлены экспериментальные результаты исследования влияния постростовой обработки тонких монокристаллических пленок катион-замещенных феррит-гранатов на их структурные и магнитные характеристики. Показано, что кислотное травление поверхности монокристаллических гранатов, как правило, уступает в качестве обработки поверхности методу ионно-плазменного травления. При исследовании морфологии поверхностного слоя и спектров ферромагнитного резонанса в эпитаксиальной пленке феррит-граната показало, что использование в качестве травителя ортофосфорной кислоты привело к уменьшению шероховатости поверхности, однако не обеспечило качественного сохранения магнитных характеристик по сравнению с ионно-плазменным методом обработки, который не ухудшил структуру и не разрушил кристаллическую решетку феррит-гранатов.

Ключевые слова: ионное травление, кислотное травление, феррит-гранат, ферромагнитный резонанс, профиль края, маскирование.

DOI: 10.21883/0000000000

Введение

Эпитаксиальные пленки феррит-гранатов (ЭПФГ, англ. EIGF), при добавлении редкоземельных компонентов, сравнительно давно и успешно широко применяются при разработке и изготовлении различных технических устройств. В последние десятилетия большие усилия направлены на применение ЭПФГ при создании высокочувствительных датчиков магнитного поля [1–4], в том числе при изготовлении устройств и элементов на их основе для термомагнитной записи информации [1], топографирования области и магнитооптической визуализации неоднородных магнитных полей [2,5]. В настоящий момент сенсоры магнитооптических ЭПФГ, выращиваемые на подложках из гадолиний-галлиевого граната, используются для изготовления различных устройств в криминалистике и медицине [2,6]. Для магнитных пленок на основе железо-иттриевого граната характерна большая магнитная восприимчивость и достаточно низкие значения затухания, что позволяет использовать их в полосно-заграждающих фильтрах гигагерцового диапазона, магнитомодуляционных сенсорах, фазовращателях, направленных разветвителях, линий задержки на магнитостатических волнах, для генерации бозе-эйнштейновской конденсации магнонов и т.д. [6–15].

Чрезвычайно важная задача эпитаксиального материаловедения — повышение эффективности использования ЭПФГ, поэтому одним из направлений решения данной проблемы является поверхностная обработка синтезируемых пленок [16,17]. Это может быть необходимо как в качестве постростовой обработки (удаление загрязнений, адсорбированных поверхностью примесей и слоев с иными свойствами), так и для формирования заданного профиля (снижение краевых напряжений, форм-фактор и т.д.) [18–21]. Также возможно применение методики последовательного стравливания слоев эпитаксиальной пленки для исследования внутренней структуры и размерных зависимостей магнитных эффектов [22], соответственно большой интерес представляет изучение возможностей и влияния методов постростовой обработки на свойства таких пленок. Следовательно, при проведении широких исследований для отработки технологических возможностей изготовления эпитаксиальных пленок с заданными свойствами требуется выбор оптимального метода обработки поверхности.

Для травления поверхности пленок феррит-гранатов как правило применяются методы химической обработки (кислотная, щелочная) [23–26] и ионного травления (ионным пучком, в тлеющем и коронном разряде) [27–29]. Методы химического травления позволяют удалять вещество с поверхности пленки с большей скоростью, однако обладают селективностью в отношении дефектов и неоднородностей структуры. Методы ионного травления, наоборот, позволяют выполнять травление ЭПФГ с относительно малой скоростью, что весьма актуально для пленок нанометровой толщины, и при этом позволяют реализовать анизотропное травление с высокой степенью однородности по поверхности.

Настоящая работа посвящена исследованию влияния двух разных методов постростовой обработки (кислот-

ное и ионно-плазменное травление) поверхности тонких монокристаллических пленок катион-замещенных феррит-гранатов на их структурные и магниторезонансные свойства. Приведенные результаты демонстрируют сравнение воздействия на состояние исходных образцов, кислотных и ионно-плазменных методик травления поверхности ЭПФГ, исходя из разных задач их применения.

1. Экспериментальные методики

В настоящей работе для синтеза монокристаллических образцов ЭПФГ применяется метод жидкофазной эпитаксии, который заключается в кристаллизации пленок из пересыщенного раствора-расплава. Для создания заданного раствор-расплава шихта из гранатообразующих компонентов, легкоплавкого растворителя и дополнительных согласующих добавок расплавляется в специальном платиновом тигле при температурах около 1390 K на протяжении 3–4 h с последующей гомогенизацией при этой температуре в течение 9–10 h, из которых от 2 до 4 h — с постоянным перемешиванием платиновой мешалкой, далее температура раствор-расплава постепенно снижается до температур ниже точки насыщения (около 1210–1240 K) в течение 2 h.

В качестве подложек применяются немагнитные монокристаллические гранаты. Подложка опускается в раствор-расплав и играет роль затравки для роста эпитаксиальной пленки, при этом температура системы поддерживается постоянной. При качественном подборе легирующих элементов и режимов роста существует возможность достижения минимального рассогласования параметров решетки монокристаллической подложки и синтезируемой пленки Δa, что позволяет сформировать эпитаксиальные слои с повышенным структурным совершенством и заданным направлением кристаллографической анизотропии.

В роли объекта исследования выступают пленки ЭПФГ, выращенные на монокристаллических подложках гадолиний-галлиевого граната $Gd_3Ga_5O_{12}$ (ГГГ, GGG), толщиной 500 μm с ориентацией поверхности (111). Монокристаллические пленки феррит-граната состава $(YLa)_3(FeGaAl)_5O_{12}$ (с толщиной 2.1 μm) получены с применением технологии кристаллизации из пересыщенного раствор-расплава, содержащего гранатообразующие, легирующие и согласующие элементы в легкоплавком растворителе $PbO-Ba_2O_3$ [30].

В качестве постростовой обработки для удаления поверхностных слоев синтезированных пленок, а также для формирования структур с определенной планарной конфигурацией и пространственным профилем (например, при регистрации спектров ферромагнитного резонанса (ФМР) для уменьшения дополнительных сигналов, связанных с возбуждением магнитостатических волн, и наличием краевых дефектов) применяется ионно-плазменная и/или кислотная обработка поверхности ЭПФГ.

Ионно-плазменная обработка синтезируемых монокристаллических образцов осуществлялась ионами ВЧ плазмы, полученной в смеси газов Ar (60 mol%) + + O_2 (40 mol%) при давлении 1 Pa, с использованием малогабаритной вакуумной установки глубокого анизотропного травления „МВУ ТМ Плазма 06“ (НИИ ТМ, Зеленоград). Травление материала происходило в результате физического взаимодействия между ускоряющимися в плазме ионами аргона и атомами пленки поверхностного слоя в условиях низкого давления. При этом возможно нарушение стехиометрии по кислороду в приповерхностных слоях пленки феррит-граната, данное негативное влияние на структуру пленок как раз частично компенсируется добавлением кислорода в реакционный объем (оптимальная концентрация определена эмпирическим путем). При этом скорость травления снижается, однако качество поверхности улучшается и, как следствие, снижается влияние поверхностных дефектов на свойства пленки. Использование кислородной плазмы для анизотропного травления феррит-гранатовых пленок, с улучшением шероховатости поверхности также описано в работе [22]. Для создания планарных структур с заданным профилем травления в данном исследовании использовалась немагнитная твердотельная маска из плоскопараллельных пластин ГГГ [31].

В качестве кислотной обработки применялась классическая технология травления в ортофосфорной кислоте H_3PO_4 при температуре 200 °C с применением планарной маски на основе фоторезиста марки ФП-383 для формирования круглого профиля. Нанесение слоя фоторезиста осуществлялось методом скоростного центрифугирования на заранее подготовленную поверхность однородным слоем толщиной до 3 μm с последующим экспонированием через фотошаблон. Более подробно с технологией создания маски и методикой кислотного травления можно ознакомится в работах [32–34].

Высота стравленного слоя в точке исследования образца $h(x)$ измерялась с применением микроинтерферометра Линика МИИ-4 с блоком цифровой обработки. Высота определялась по величине сдвига интерференционной картины в соответствии с формулой

$$h(x) = \frac{a(x)}{2b}\lambda,$$

где $a(x)$ — величина сдвига интерференционной картины в исследуемой точке x; b — значение периода интерференции, λ — длина волны излучения (в настоящей работе применялся зеленый светофильтр с $\lambda = 532$ nm).

Исследование магниторезонансных свойств эпитаксиальных пленок (генерация основных и МСВ мод, наличие структурно связанных шумов и т. д.) выполнялось с помощью анализа спектров ферромагнитного резонанса (ФМР), полученных на спектрометре SPINSCAN X. Спектрометр дает возможность исследовать дифференциальные спектры ФМР при полевой развертке в двух конфигурациях ориентации внешнего магнитного поля по отношению к плоскости исследуемой пленки: перпендикулярной (0° по отношению к нормали) и параллельной (90°).

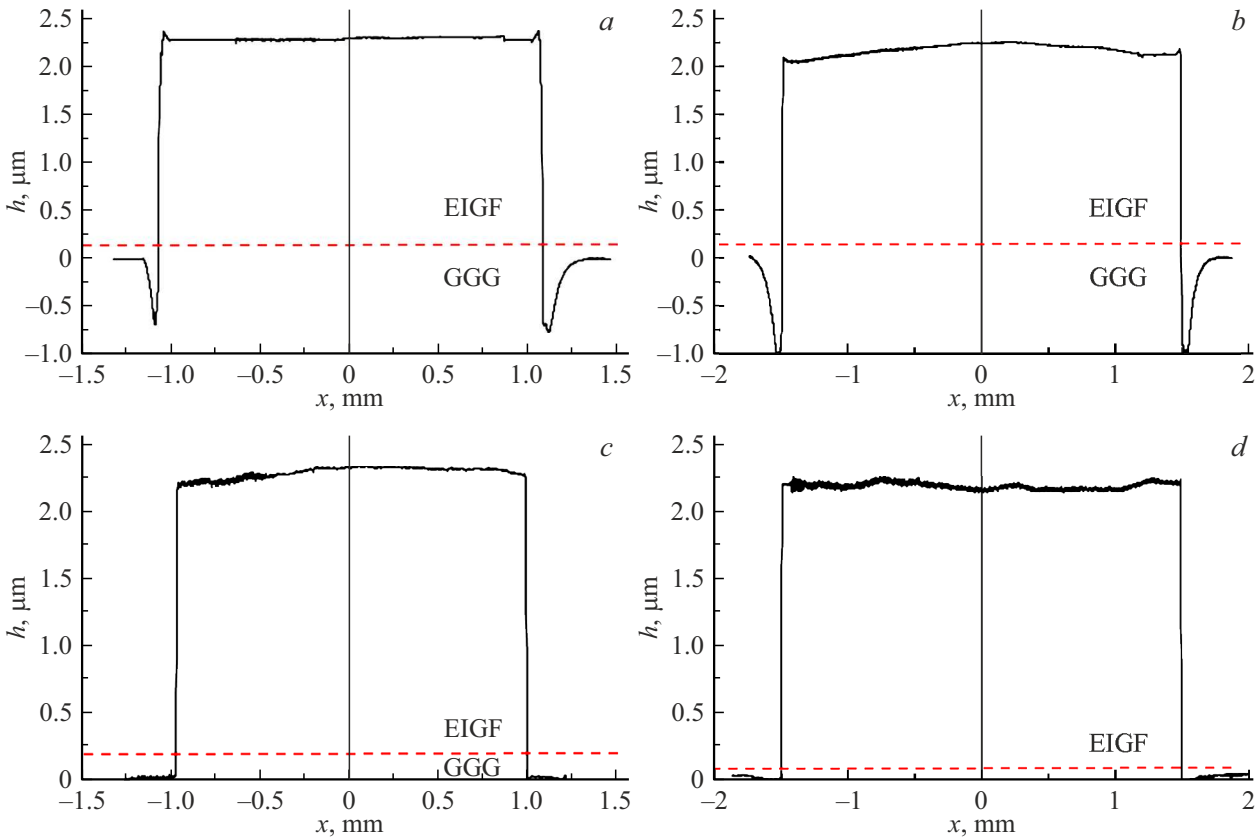

Рис. 1. Профиль поперечного сечения дисков, полученных методами ионно-плазменного травления (a, b) и кислотного травления (c, d), диски диаметром 2 mm (a, c) и диаметром 3 mm (b, d). Штриховой линией показана граница между пленкой ЭПФГ и подложкой ГГГ.

Исследования поверхностной морфологии осуществлялись методом атомно-силовой микроскопии на оборудовании Ntegra фирмы NT-MDT. Детектируя силу взаимодействия между зондом и поверхностью исследуемого образца ЭПФГ при постепенном прохождении зонда над всей заданной областью пленки, можно исследовать неровности поверхности.

2. Результаты и обсуждение

2.1. Формирование профиля при травлении через маску

Для получения тонкопленочных структур с заранее заданной геометрией использовалось травление поверхности пленок с применением маски, при этом поверхность, закрытая маской, травлению не подвергалась. Методами кислотного и ионно-плазменного травления эпитаксиальной пленки феррит-граната пленки состава $(YLa)_3(FeGaAl)_5O_{12}$ толщиной $h = 2.1\,\mu$m были изготовлены диски диаметром 2 и 3 mm. На рис. 1 показаны профили поперечного сечения сформированных дисков. Профили получены при радиальном сканировании на профилометре Mitutoyo SJ-410.

Видно, что в процессе ионно-плазменной обработки поверхности ЭПФГ на границе диэлектрической маски возникают краевые эффекты, связанные с образованием наведенного статического заряда [21], которые приводят к формированию неоднородности ионного потока и „уплотнению“ плазмы в области приграничной к краю маски. В результате этого по периметру маскированной части пленки возникают вытравленные углубления в подложке (рис. 1, a, b). Однако данные артефакты не влияют на структуру боковых поверхностей сформированной дисковой структуры.

При кислотном травлении описанные краевые эффекты менее выражены (рис. 1, c, d), что позволяет сформировать на краю зоны маскирования четко выраженную ступеньку без существенных искажений прямоугольного профиля.

Таким образом, оба метода обеспечивают формирование достаточно четких профилей маскированной области ЭПФГ с минимальным искажением боковых граней структуры на границе травления. Влияние данного профиля на магниторезонансные свойства структур будет показано далее.

2.2. Структура поверхности при послойном травлении

Поскольку качество поверхности и структурное совершенство ЭПФГ, в том числе сформированное в про-

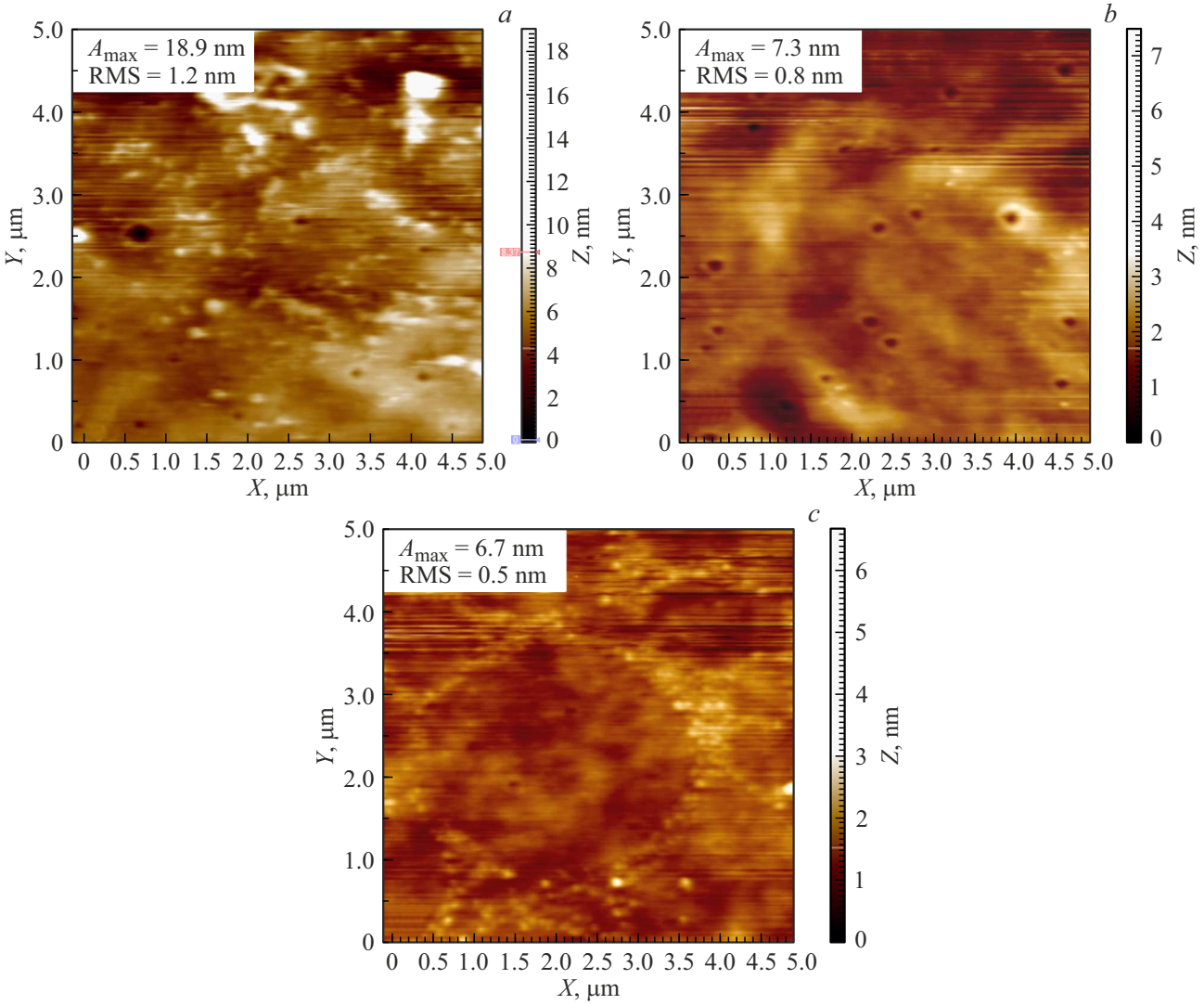

Рис. 2. АСМ анализ морфологии поверхности ЭПФГ $(YLa)_3(FeGaAl)_5O_{12}$ ($h = 2.1\,\mu$m) после ионной обработки при стравливании слоя толщиной 0.5 (*a*), 1 (*b*) и 1.5 μm (*c*).

цессе постростовой обработки, в значительной степени оказывает влияние на эффективность их практического применения, было исследовано влияние кислотного и ионного травления на структуру поверхности пленок. Анализ морфологии ЭПФГ $(YLa)_3(FeGaAl)_5O_{12}$ (квадрат 5×5 mm толщиной $h = 2.1\,\mu$m) осуществлялся при помощи АСМ сканирования при послойном травлении поверхности. Сравнение полученных результатов проводилось по нескольким параметрам, а именно максимальный разброс по высоте A_{max} и среднеквадратичное значение отклонения от среднего значения RMS (по сути, средняя шероховатость). У исходного образца магнитной пленки максимальный разброс по высоте A_{max} составляет 51.2 nm, а среднеквадратичное значение отклонения RMS = 1.4 nm.

После ионного стравливания верхнего слоя толщиной 0.5 μm (остаточная толщина пленки 1.6 μm) можно наблюдать более чем двукратное уменьшение значения параметра разброса (рис. 2, *a*); так, величина A_{max} составила 18.9 nm, а среднеквадратичное отклонение RMS — 1.2 nm. После второго этапа травления (рис. 2, *b*) при суммарном снятии слоя толщиной 1 μm (остаточная толщина — 1.1 μm) значения параметров уменьшаются, и составляют $A_{max} = 7.3$ nm и RMS = 0.8 nm соответственно. В результате третьего цикла ионной обработки (рис. 2, *c*) при суммарном стравливании слоя толщиной 1.5 μm (остаточная толщина — 0.6 μm) соблюдается общая тенденция уменьшения значений исследуемых параметров. В данном случае величина A_{max} составляет уже 6.7 nm, а среднеквадратичное значение RMS — 0.5 nm.

Аналогичным образом проведены исследования влияния кислотного травления на параметры морфологии поверхности ЭПФГ (рис. 3).

Видно, что после первого этапа кислотного травления (рис. 3, а) в результате удаления слоя толщиной

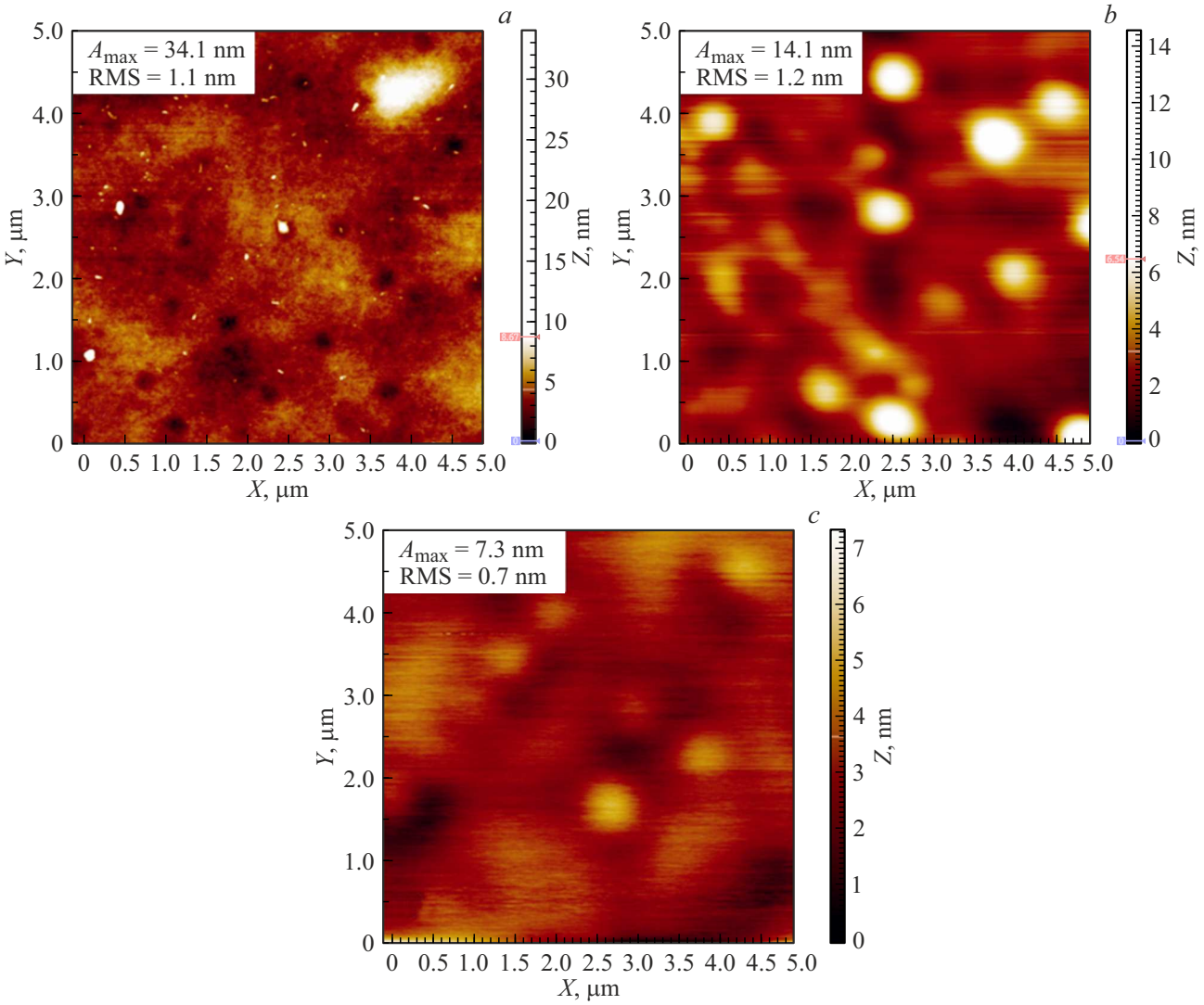

Рис. 3. АСМ анализ морфологии поверхности ЭПФГ $(YLa)_3(FeGaAl)_5O_{12}$ ($h = 2.1\,\mu$m) после кислотной обработки при стравливании слоя толщиной 0.5 (*a*), 1 (*b*) и 1.5 μm (*c*).

0.5 μm (остаточная толщина пленки — 1.6 μm) среднеквадратичное отклонение RMS составляет 1.1 nm, а максимальный разброс по высоте A_{max} – 34.1 nm. После суммарного удаления слоя толщиной 1 μm при остаточной толщине 1.1 μm (рис. 3, *b*), среднеквадратичное отклонение RMS практически не меняется и составляет 1.2 nm, при этом максимальный разброс рельефа по высоте уменьшается до 14.1 nm. На завершающем третьем этапе травления (рис. 3, *c*) при удалении 1.5 μm (остаточная толщина — 0.6 μm) значения указанных параметров уменьшаются и составляют $A_{max} = 7.3$ nm, RMS = 0.7 nm.

На рис. 4 показано изменение параметров шероховатости поверхности ЭПФГ при послойном травлении различными методами. По оси абсцисс показана толщина удаленного слоя (глубина травления).

Таким образом, видно, что при послойном ионном травлении эпитаксиальной пленки наблюдается значительное уменьшение значений среднеквадратичного отклонения и максимального разброса шероховатости по высоте. В наблюдаемых экспериментах метод ионного травления дает в среднем меньшее значение параметров шероховатости по сравнению с методом кислотного травления.

2.3. Особенности ФМР при послойном травлении

Для анализа влияния ионного травления на магнитные свойства ЭПФГ для всех описанных выше структур были выполнены исследования особенностей ФМР при различной конфигурации внешнего подмагничивающего поля. На рис. 5 представлены ФМР спектры при направлении внешнего поля параллельно нормали к пленке (перпендикулярный резонанс). На рис. 5, *a* показан ФМР спектр исходной пленки феррит-граната в виде квадрата со стороной 5 mm. В спектре можно выделить группу линий в диапазоне 406–418 mT, которая соответствует

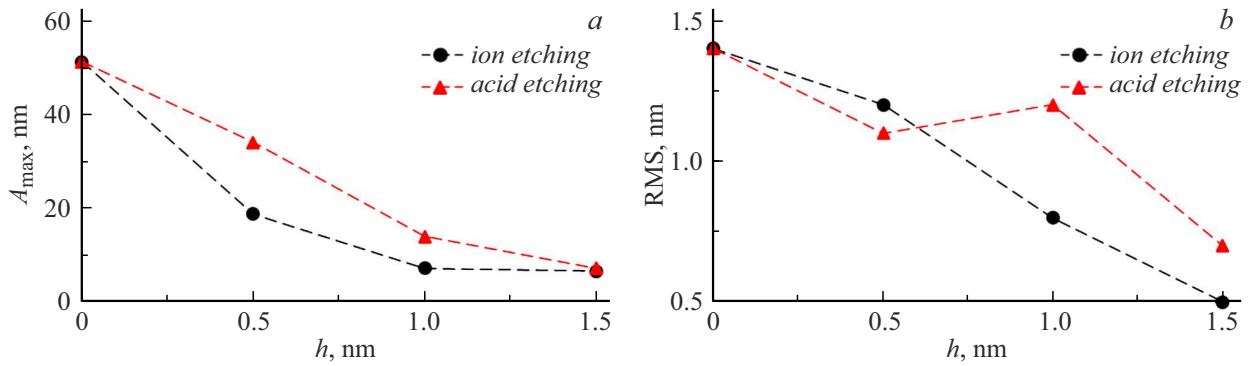

Рис. 4. Изменение параметров шероховатости поверхности ЭПФГ при послойном травлении различными методами; *a* — параметр A_{max}, *b* — параметр RMS.

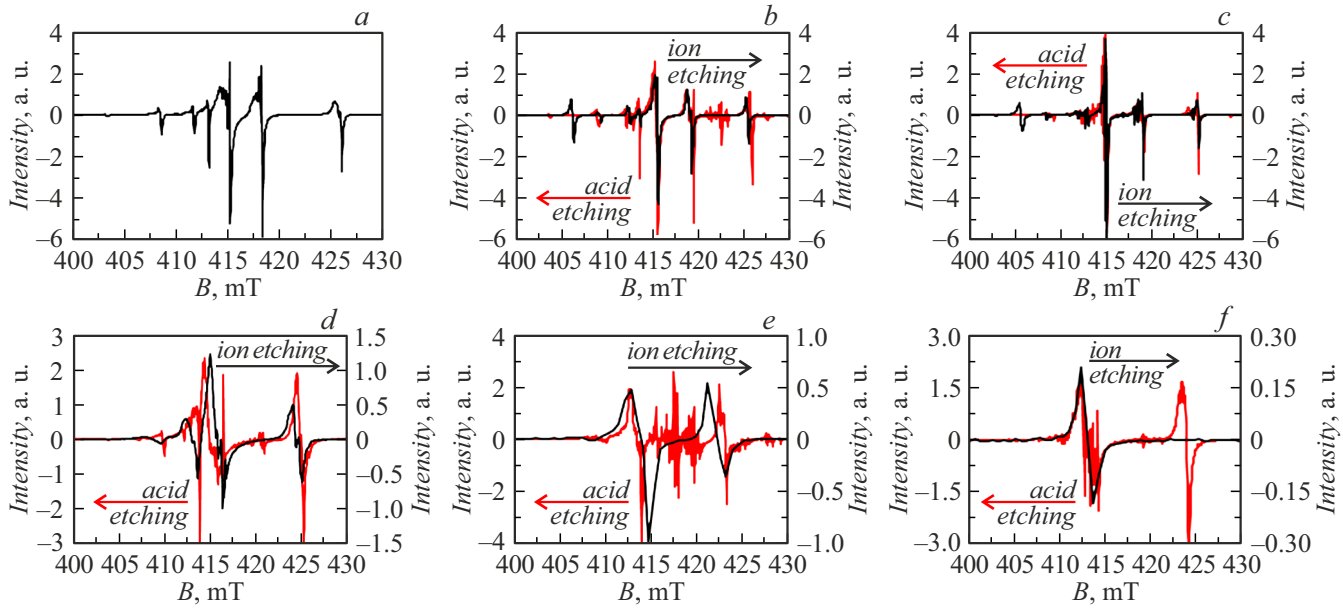

Рис. 5. Резонансные кривые ФМР (пленка $(YLa)_3(FeGaAl)_5O_{12}$, $h = 2.1\,\mu$m) для перпендикулярного (0°) резонанса (красная линия — кислотное травление, черная линия — ионное травление); *a* — квадрат ($h = 2.1\,\mu$m, до обработки), *b* — диск $R = 1.5$ mm, *c* — диск $R = 1$ mm, *d* — квадрат ($h = 1.6\,\mu$m), *e* — квадрат ($h = 1.1\,\mu$m), *f* — квадрат ($h = 0.6\,\mu$m).

объемной моде с основной резонансной линией 415 mT, модулированной резонансами магнитостатических волн (МСВ), а также можно выделить отдельную резонансную линию на 426 mT, связанную с поверхностной модой.

При изменении геометрии образца на круг радиусом 1.5 mm (рис. 5, *b*) в спектре ФМР наблюдаются изменения, связанные с эффективностью возбуждения МСВ по сравнению с основной модой, при этом положение спектральных линий не меняется. Аналогичные изменения прослеживаются и при уменьшении радиуса круга до 1 mm (рис. 5, *c*). При этом основная линия на 415 mT становится четко выраженной на фоне относительно слабых сигналов МСВ. Следует отметить, что, поскольку отсутствует воздействие на поверхность замаскированной области (удаляется лишь пленка вне маски), мода поверхностных колебаний не меняется при изменении планарной формы образца. Аналогично на вид спектра несущественно влияет и способ травления, поскольку, как было показано выше (рис. 1), форма профиля получаемого диска практически одинакова для обоих методов.

Несколько иначе проявляет себя ФМР при послойном удалении части пленки без изменения планарной формы. Из рис. 5, *d* видно, что после удаления на поверхности исходной ЭПФГ в виде квадрата слоя толщиной 500 nm (примерно 1/4 толщины пленки) спектр модуляции МСВ объемной моды становится менее выраженным, при этом самих линий становится меньше, а располагаются они дальше. Более выраженной становится и мода поверхностных колебаний. Следует отметить, что в спектре ФМР образца, полученного при ионном травлении, наблюдается меньшее зашумление

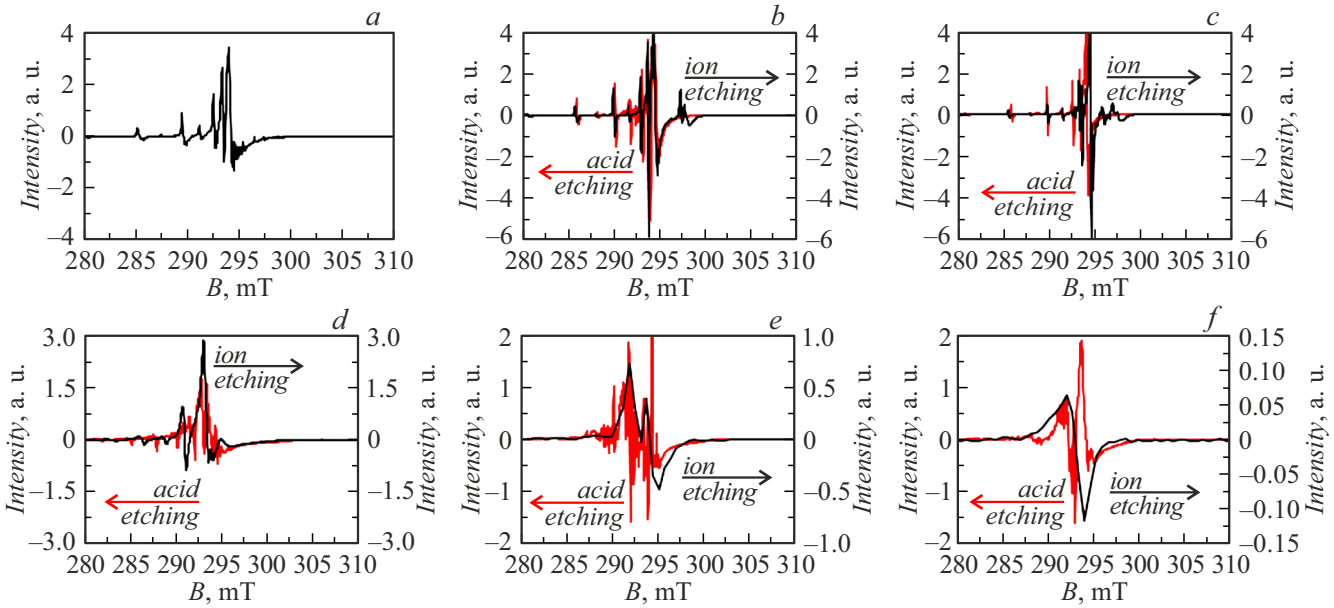

Рис. 6. Резонансные кривые ФМР (пленка $(YLa)_3(FeGaAl)_5O_{12}$, $h = 2.1\,\mu$m) для параллельного (90°) резонанса (красная линия — кислотное травление, черная линия — ионное травление); *a* — квадрат, ($h = 2.1\,\mu$m, до обработки), *b* — диск $R = 1.5$ mm, *c* — диск $R = 1$ mm, *d* — квадрат ($h = 1.6\,\mu$m), *e* — квадрат ($h = 1.1\,\mu$m), *f* — квадрат ($h = 0.6\,\mu$m).

модами МСВ по сравнению с кислотным травлением, что обусловлено лучшими параметрами шероховатости поверхности. После ионного стравливания слоя толщиной $1\,\mu$m (рис. 5, *e*) спектр ФМР образца содержит только две однородные линии объемной и поверхностной мод. Спектр ФМР образца после кислотного травления также содержит две моды объемных и поверхностных колебаний, при этом наблюдается более сильное зашумление модами МСВ. Ионное стравливание слоя толщиной $1.5\,\mu$m (рис. 5,*f*) приводит к формированию спектра ФМР с одной четко выраженной резонансной модой. После кислотного травления в спектре ФМР по-прежнему сохраняются две моды, при этом количество дополнительных резонансов МСВ уменьшается, что может быть связано с уменьшением шероховатости поверхности (рис. 4).

Аналогичная динамика изменения спектров ФМР наблюдается и в параллельной конфигурации, когда вектор внешнего поля лежит в плоскости пленки (рис. 6). Так, при изменении планарной формы образца (рис. 6, *a*–*c*) набор модулирующих линий МСВ сохраняется, изменяется лишь интенсивность линий МСВ относительно основной линии объемной моды ФМР. Форма спектров в данном случае также слабо зависит от используемого метода травления.

Поскольку мы имеем дело с пленкой, имеющей тип магнитной анизотропии „легкая плоскость“ (резонансные поля в параллельной конфигурации меньше, чем в перпендикулярной), поверхностная мода в данной конфигурации отсутствует.

При изменении толщины пленки феррит-граната без изменения планарной структуры (рис. 6, *a*, *d*–*f*) также наблюдается уменьшение количества модулирующих линий МСВ по мере утоньшения пленки. При этом для образцов, полученных методом кислотного травления, в спектрах ФМР для параллельной конфигурации поля наблюдается большая зашумленность сигналами МСВ, аналогично спектрам ФМР в перпендикулярной конфигурации.

В табл. 1, 2 представлены результаты оценки магниторезонансных характеристик пленок (резонансные поля B_{res}, ширина резонансных линий ΔB, гиромагнитное отношение γ и эффективное поле анизотропии H_{eff}), полученных из анализа спектров ФМР после ионного и кислотного травления соответственно. Данные приведены как для основной резонансной моды (ОМ), так и для поверхностной моды (ПМ) для следующих образцов пленки $(YLa)_3(FeGaAl)_5O_{12}$:

1. ЭПФГ квадрат, $h = 2.1\,\mu$m (до обработки) (рис. 5, *a*, 6, *a*);
2. ЭПФГ диск $R = 1.5$ mm (рис. 5, *b*, 6, *b*);
3. ЭПФГ диск $R = 1$ mm (рис. 5, *c*, 6, *c*);
4. ЭПФГ квадрат, $h = 1.6\,\mu$m (рис. 5, *d*, 6, *d*);
5. ЭПФГ квадрат, $h = 1.1\,\mu$m (рис. 5, *e*, 6, *e*);
6. ЭПФГ квадрат, $h = 0.6\,\mu$m (рис. 5, *f*, 6, *f*).

Для корректного анализа указанных параметров, особенно при определении ширины резонансной линии, использовалось построение интегральных ФМР спектров (рис. 7) на основании измеренных дифференциальных (рис. 5 и 6). Это необходимо в связи с наличием большого количества шумов на дифференциальных спектрах ФМР, обусловленных модулированностью основных резонансных линий.

Как видно из представленных результатов, различные методы травления поверхности ЭПФГ дают схожие численные значения основных магниторезонансных пара-

Таблица 1. Магниторезонансные параметры ЭПФГ после ионного травления

№	B_{res}, mT			ΔB, mT			$\gamma \cdot 10^{-7}$, $s^{-1} \cdot E^{-1}$		H_{eff}, E	
	0°		90°	0°		90°				
	ОМ	ПМ	ОМ	ОМ	ПМ	ОМ	ОМ	ПМ	ОМ	ПМ
1	415.2	426.1	294.3	1.2	0.9	0.5	1.773	1.756	−822.9	−898.6
2	414.8	424.9	294.2	0.9	0.3	0.5	1.774	1.758	−820.8	−890.9
3	414.4	424.3	294.5	0.6	0.4	0.7	1.774	1.758	−815.9	−884.7
4	415.1	423.7	293.3	1.6	0.8	1.4	1.777	1.763	−829.2	−888.9
5	414.1	422.5	294.4	2.1	1.6	3.1	1.775	1.761	−814.6	−872.9
6	412.6	–	294.3	1.5	–	1.9	1.777	–	−804.9	–

Таблица 2. Магниторезонансные параметры ЭПФГ после кислотного травления

№	B_{res}, mT			ΔB, mT			$\gamma \cdot 10^{-7}$, $s^{-1} \cdot E^{-1}$		H_{eff}, E	
	0°		90°	0°		90°				
	ОМ	ПМ	ОМ	ОМ	ПМ	ОМ	ОМ	ПМ	ОМ	ПМ
1	415.2	426.1	294.3	1.2	0.9	0.5	1.773	1.756	−822.9	−898.6
2	415.3	425.4	294.1	1.0	0.4	0.6	1.774	1.757	−825.0	−895.1
3	413.8	424.2	294.7	0.8	0.5	0.9	1.774	1.757	−810.4	−882.6
4	414.8	424.8	293.7	2.0	0.9	3.0	1.776	1.760	−824.3	−893.8
5	413.4	423.1	293.4	1.6	0.9	4.6	1.780	1.764	−817.6	−884.0
6	412.9	424.0	294.2	2.1	1.0	2.2	1.777	1.759	−807.6	−884.7

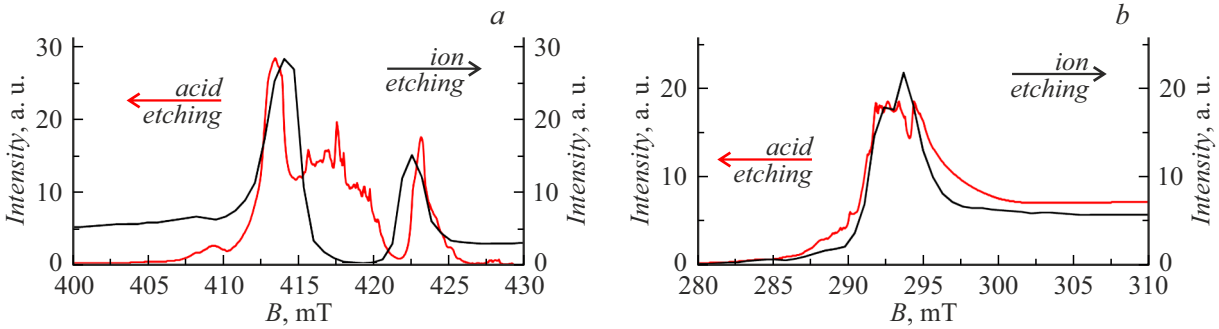

Рис. 7. Пример построения интегральных ФМР спектров на основании дифференциальных (рис. 5, 6) для пленки ЭПФГ толщиной $h = 1.1\,\mu$m; *a* — перпендикулярный резонанс (0°), *b* — параллельный резонанс (90°).

метров, однако по-прежнему стоит отметить значительную зашумленность спектров ФМР для пленок после кислотного травления.

2.4. Влияние пространственной формы пленки на магнитные свойства

К тонким магнитным пленкам на основе железо-иттриевого феррит-граната, применяемым для решения практических задач при измерении сверхслабых магнитных полей [35], предъявляются требования малых значений затухания и значительной магнитной восприимчивости. Это позволяет использовать их в качестве чувствительных элементов в магнитомодуляционных датчиках [32,36]. Главным сдерживающим фактором качественного динамического перемагничивания магнитомодуляционных сенсоров является возникновение помех, связанных с возникновением краевых магнитных доменов в области границ образца пленки. Взаимодействие краевых доменов с дефектами пленки в процессе перемагничивания приводит к формированию дополнительных шумов. Для снижения влияния краевых доменов пространственный профиль чувствительного элемента сенсора в форме пленочного диска предпочтительно сформировать максимально гладким, в пределе стремящимся к эллипсоидальному [3]. Для решения настоящей проблемы нами разработана технология создания гладкого профиля, близкого к эллиптическому, путем расположения масок определенной формы из немагнитного диэлектрика на поверхности магнитной пленки.

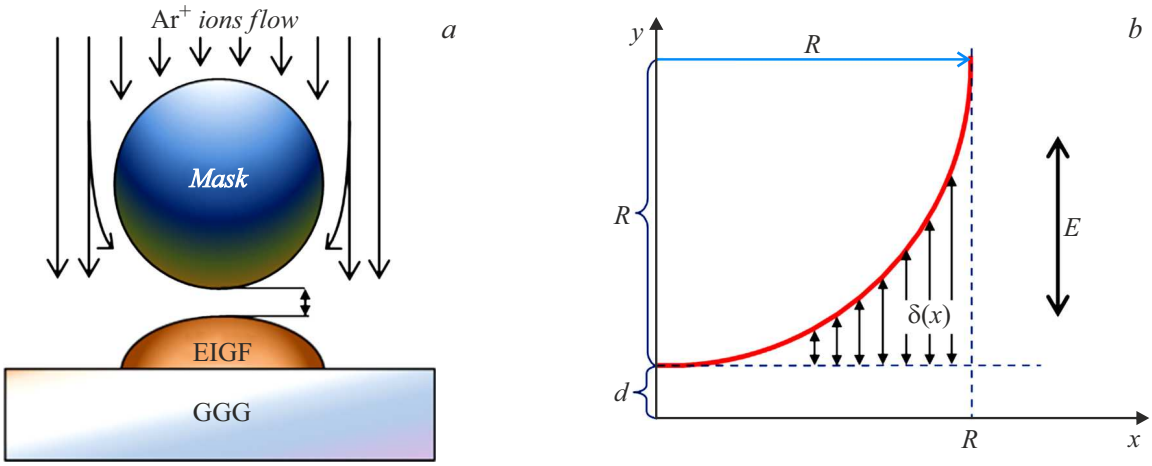

Рис. 8. Ионно-плазменное травление с использованием сферической маски: схема травления (a), рассмотренная модель (b).

2.4.1. Принцип формирования эллиптического профиля при ионном травлении

В частности, для получения эллиптического профиля травления применяется маска сферической формы (рис. 8, a), приподнятая над поверхностью пленки на фиксированное расстояние d. Таким образом, между маской и поверхностью пленки формируется неоднородный по толщине зазор. Поскольку для травления диэлектриков применяется высокочастотное травление, в разных участках образца ионы аргона, ускоряясь в поле, в зазоре между рабочей поверхностью и маской проходят разные расстояния $S = \delta + d$ (рис. 8, b), где δ — длина пробега иона при нулевом зазоре между пленкой и маской. Таким образом, ионы приобретают разную кинетическую энергию Q, которая будет определяться расстоянием S (длиной свободного пробега). Построенная на этом принципе модель предполагает оценку эффективности поверхностного распыления ускоренными ионами в переменном электромагнитном поле, когда они перемещаются в зазоре между плоской поверхностью ЭПФГ и сферической поверхностью сплошной маски.

Расстояние S, пройденное ионом Ar^+ под воздействием ускоряющего напряжения:

$$S = d + \delta = s + R\left(1 - \sqrt{\frac{x^2}{R^2}}\right),$$

где R — радиус сферической маски, расположенной над поверхностью эпитаксиальной пленки.

Уравнение движения электрона под действием переменного электрического поля:

$$\frac{d^2y}{d\tau^2} = \frac{q}{m} E_0 \sin(\omega\tau),$$

решение которого дает зависимость пройденного электроном расстояния в поле от времени:

$$S = y = \frac{qE_0}{m} \int d\tau \int \sin(\omega\tau) d\tau$$
$$= \frac{qE_0}{m\omega^2} (-\sin(\omega\tau)) + \text{const}. \quad (1)$$

С учетом граничных условий выражение (1) примет вид

$$\text{при } \tau = 0 \; S = 0 \to \text{const} = 0,$$
$$S = C_0 \sin(\omega\tau), \quad (2)$$

где

$$C_0 = -\frac{qE_0}{m\omega^2}.$$

Выражая τ из (2) и подставляя в выражение для напряженности поля, получим

$$E = E_0 \sin(\omega\tau) = E_0 \frac{S}{C_0} = CS, \quad (3)$$

где $C = E_0/C_0$.

Ускоряющее напряжение с учетом (3):

$$dU = E(S)dS = CSdS,$$

$$U = C \int SdS = \frac{C}{2} S^2 + \text{const}.$$

Введем граничные условия

$$\text{при } S = 0 \; U = 0 \to \text{const} = 0.$$

Тогда выражение для ускоряющего напряжения примет вид

$$U = \frac{C}{S} S^2.$$

Таким образом, энергия ионов аргона, в зависимости от пройденного ими расстояния S в зазоре между

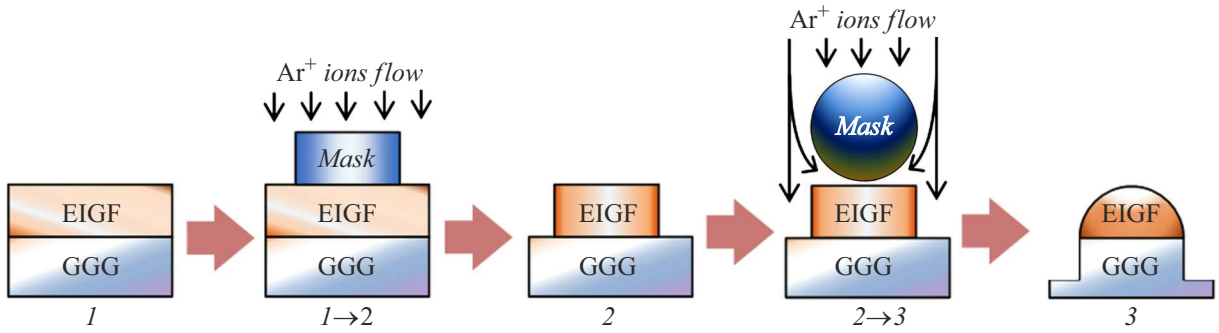

Рис. 9. Поэтапная схема формирования эллиптического профиля пленки феррит-граната при ионном травлении: *1* — исходная пленка; *1→2* — травление с применением маски в виде диска $R = 1.5$ mm; *2* — сформированный профиль травления в виде диска; *1→2* — травление с применением маски в виде шара $R = 1.5$ mm; *3* — итоговая структура с эллиптичным профилем.

сферической маской и обрабатываемой поверхностью, будет описываться квадратичной функцией

$$Q = Uq = \frac{Cq}{2} S^2.$$

При этом вероятность распыления поверхности будет пропорциональна

$$P \sim \exp\left(\frac{Q}{W}\right),$$

где W — энергия выхода (выбивания) атома с поверхности.

Тогда скорость распыления поверхности ускоренными ионами аргона в разных точках поверхности $v(x)$ может быть описана уравнением Аррениуса (вероятность активации):

$$v = v_{Q \gg W} \exp\left(-\frac{2W}{qCS^2}\right),$$

где $v_{Q \gg W}$ — значение скорости распыления при условии $Q \gg W$.

Таким образом, наличие неоднородного щелевого зазора между поверхностью пленки и сферической маски приводит к пространственно-неоднородному полю скоростей травления и формированию профиля, близкого к эллиптическому.

2.4.2. Формирование эллиптического профиля пленки феррит-граната

Технология создания пленочных элементов с эллиптическим профилем показана на рис. 9. Формирование из ЭПФГ *1* сперва диска *2*, а затем эллиптического профиля *3* (рис. 9) состоит из нескольких стадий. Стадия $1 \to 2$ предполагает, что непосредственно на поверхность образца ЭПФГ в форме квадрата размером 5×5 mm накладывается маска в виде пластины толщиной 0.5 mm из монокристаллического граната $Gd_3Ga_5O_{12}$ в форме диска диаметром 3 mm, и затем осуществляется первый этап ионного травления на глубину, равную толщине ЭПФГ. Соответствующий поперечный профиль диска после травления ЭПФГ $(YLa)_3(FeGaAl)_5O_{12}$ толщиной $2\,\mu$m представлен на рис. 10, *a*, штрихпунктирной линией обозначена граница интерфейса пленки ЭПФГ (EIGF) и подложки ГГГ.

В ходе стадии $2 \to 3$ на поверхности созданной дисковой структуры располагается керамическая маска сферической формы диаметром 3 mm и осуществляется второй этап ионного травления. В результате травления (рис. 10, *b*) получается гладкий профиль высотой $2\,\mu$m и шириной 3 mm, по форме, близкий к эллиптическому. Штрихпунктиром обозначена граница интерфейса пленки и подложки, пунктиром показана модельная аппроксимация профиля. Профиль травления, полученный с помощью зондового профилометра, демонстрирует хорошее соответствие между моделью и экспериментальными результатами.

2.4.3. ФМР в пленках с различным профилем

Анализ влияния пространственной формы пленки осуществлялся путем исследования особенностей ФМР при параллельном (90°) и перпендикулярном (0°) направлении подмагничивающего поля B относительно плоскости пленки. Результаты исследования после каждой стадии ионной обработки представлены на рис. 10. Можно отметить, что после всех этапов травления значительно снижается интенсивность и количество мод СМВ, при этом резонансные поля ФМР меняются незначительно.

Так, при перпендикулярном направлении B наблюдаются два сигнала: B_{res} по мере травления меняется от 414.1 до 415.4 mT и от 424.5 до 423.8 mT соответственно. При параллельном — B_{res} меняется от 287.2 до 290.5 mT. Значение ширины линий ФМР ΔB, наоборот, существенно уменьшается. Так, в случае для необработанного образца пленки (рис. 11, *a*) ΔB в перпендикулярной конфигурации составляет 2.0 и 1.3 mT, а в параллельной — 5.2 mT. После вытравливания диска (рис. 11, *b*) ΔB в перпендикулярной конфигурации уменьшается до 1.3 и 0.7 mT, а в параллельной ΔB составляет 1.5 mT соответственно. После формирования эллиптического профиля (рис. 11, *c*) ширина линии

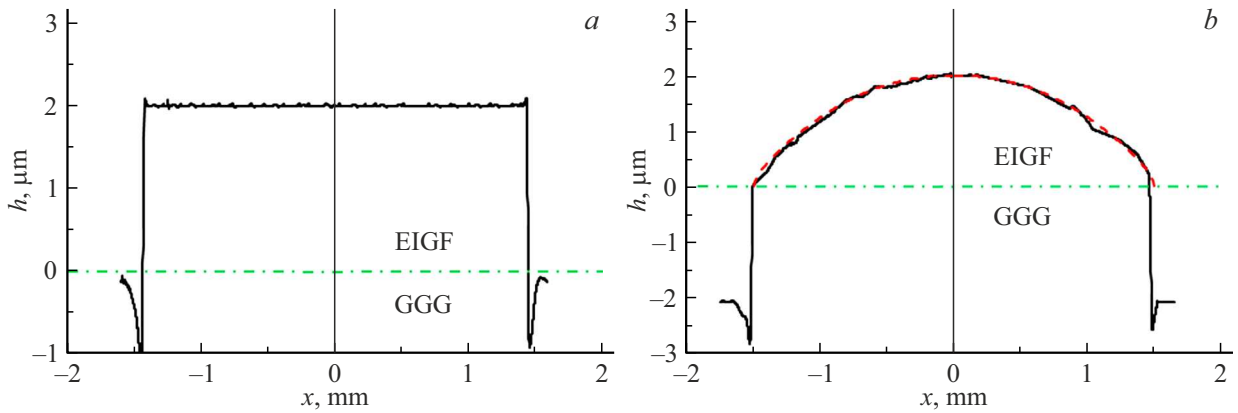

Рис. 10. Профиль поперечного сечения сформированной поверхности с использованием маски в виде диска (*a*) и последующим наложением сферической маски (*b*). Штрихпунктиром отмечена граница между пленкой ЭПФГ и подложкой ГГГ, пунктиром показана модельная аппроксимация гладкого профиля травления.

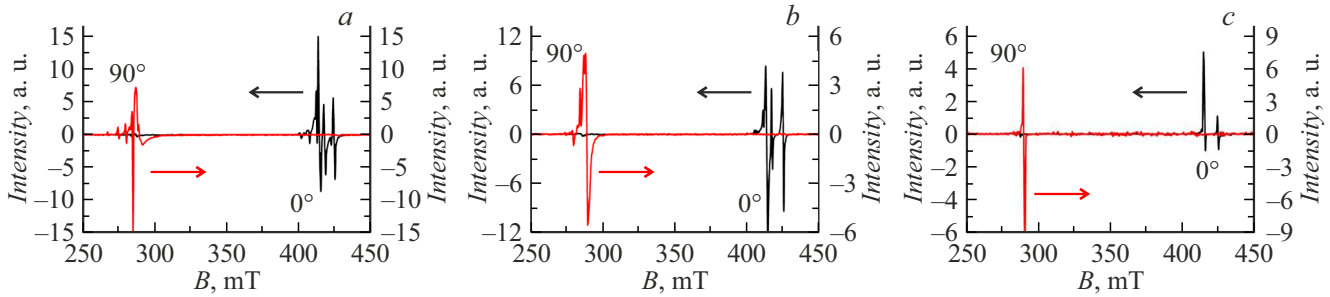

Рис. 11. Резонансные кривые ФМР (пленка $(YLa)_3(FeGaAl)_5O_{12}$, $h = 2\,\mu$m) для параллельного (90°) и перпендикулярного (0°) резонанса: *a* — ЭПФГ до обработки; *b* — диск диаметром 3 mm (рис. 9, *a*); *c* — эллипс диаметром 3 mm (рис. 9, *b*).

ФМР уменьшается до 1.2 и 0.6 mT в перпендикулярной конфигурации и 1.3 mT в параллельной соответственно. При этом следует отметить, что после формирования эллиптического профиля образца в спектрах ФМР для обеих конфигураций *B* полностью отсутствуют шумы, вызванные МСВ и краевыми дефектами, а резонансные линии представляют собой четкие единичные пики.

Таким образом, видно, что изменение пространственной формы пленки оказывает существенное влияние на особенности резонансных кривых ФМР. Так, изменение формы ЭПФГ с квадратной на эллиптическую приводит не только к уменьшению ширины резонансной линии ФМР, но и к устранению шумов, связанных с краевыми эффектами и возбуждением МСВ.

Заключение

В работе представлены результаты исследования влияния различных методов постростовой обработки, а именно ионно-плазменного и кислотного травления поверхности эпитаксиальных пленок феррит-гранатов, на изменение структурных и магниторезонансных свойств этих пленок. Показано, что при формировании различных планарных структур при травлении через маску оба метода демонстрируют схожие результаты как с точки зрения формируемого профиля травления, так и с точки зрения свойств получаемых структур.

Анализ морфологии поверхности ЭПФГ при послойном травлении различными методами показал, что параметры шероховатости уменьшаются по мере травления, при этом метод ионно-плазменного травления формирует в среднем меньшую шероховатость поверхности пленки по сравнению с методом кислотного травления.

При изменении планарной геометрии образца ЭПФГ как по форме (с квадрата на диск), так и по размеру (диаметр диска) в спектре ФМР наблюдаются изменения, связанные с эффективностью возбуждения мод МСВ по сравнению с основной модой. Показано, что при травлении через маску в виде диска метод постростовой обработки несущественно влияет на вид спектра, поскольку форма и профиль получаемых структур практически одинаковы как для ионного, так и для кислотного травления.

При послойном удалении материала ЭПФГ применение ионно-плазменного травления дает возможность существенно снизить зашумление резонансных сигналов ФМР по сравнению с использованием кислотного метода травления, что обусловлено меньшими параметрами шероховатости поверхности.

Формирование эллиптического профиля травления пленки феррит-гараната при использовании сферических

масок позволяет существенно снизить влияние краевых дефектов и полностью устранить возбуждение МСВ, что приводит к возбуждению четких единичных сигналов ФМР с минимальной шириной резонансных линий.

Финансирование работы

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта Российского научного фонда (проект № 19-72-20154, https://rscf.ru/project/19-72-20154/).

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Список литературы

[1] В.Г. Вишневский, Р.М. Михерский, С.В. Дубинко. ЖТФ, **72** (2), 96 (2002).
[2] N. Lugovskoy, V. Berzhansky, D. Glechik, A. Prokopov. J. Phys.: Conf. Ser., **1124**, 5 051063 (2018). DOI: 10.1088/1742-6596/1124/5/051063
[3] П.М. Ветошко, Н.А. Гусев, Д.А. Чепурнова, Е.В. Самойлова, И.И. Сыворотка, И.М. Сыворотка, А.К. Звездин, А.А. Коротаева, В.И. Белотелов. Письма в ЖТФ, **42** (16), 64 (2016). [P.M. Vetoshko, N.A. Gusev, D.A. Chepurnova, E.V. Samoilova, I.I. Sera, I.M. Sera, A.K. Zvezdin, A.A. Korotaeva, V.I. Belotelov. Tech. Phys. Lett., **42** (8), 860 (2016). DOI: 10.1134/S1063785016080289]
[4] С.Л. Высоцкий, М.Е. Селезнев, Ю.В. Никулин, А.В. Кожевников, Г.М. Амаханов, А.Г. Темирязев. ФТТ, **66** (7), 1057 (2024). DOI: 10.61011/FTT.2024.07.58373.34HH
[5] А. Малоземов, Дж. Слонзуски. *Доменные стенки в материалах с цилиндрическими магнитными доменами* (Мир, М., 1982)
[6] С.В. Левый, Ю.С. Агалиди, В.Г. Вишневский. Известия вузов. Радиоэлектроника, **41** (8), 74 (1998).
[7] (Ü). Özgür, Y. Alivov, H. Morko, J. Mater. Sci.: Mater. Electron., **20** (9), 789 (2009). DOI: 10.1007/s10854-009-9923-2
[8] Р.М. Егужокова, А.И. Иванова, Е.М. Семенова. Физико-химические аспекты изучения кластеров, наноструктур и наноматериалов, **11**, 123 (2019).
[9] Ю.М. Буньков. УФН, **180** (8), 884 (2010). DOI: 10.3367/UFNr.0180.201008m.0884 [Yu.M. Bunkov. Phys. Usp., **53** (8), 848 (2010). DOI: 10.3367/UFNe.0180.201008m.0884]
[10] А. Устинов, В. Кочемасов, Е. Хасьянова. Электроника, **8** (00148), 86 (2015).
[11] К.В. Бубликов, С.Е. Шешукова, Е.Н. Бегинин, M. Tapajna, D. Gregusov, С.Н. Крылов, А.И. Стогний, С.А. Корчагин, С.А. Никитов, А.В. Садовников. ФТТ, **65** (7), 1157 (2023). DOI: 10.21883/FTT.2023.07.55838.32H
[12] В.В. Тихонов, В.А. Губанов, А.В. Садовников. ФТТ, **63** (9), 1335 (2021). DOI: 10.21883/FTT.2021.09.51310.32H [V.V. Tikhonov, V.A. Gubanov, A.V. Sadovnikov. Phys. Solid State, **63** (10), 1569 (2021). DOI: 10.1134/S1063783421090420]
[13] С.Н. Полулях, В.Н. Бержанский, Е.Ю. Семук, В.И. Белотелов, П.М. Ветошко, В.В. Попов, А.Н. Шапошников, А.Г. Шумилов, А.И. Чернов. ЖЭТФ, **159** (2), 307 (2021). DOI: 10.31857/S0044451021020103
[14] P.A. Popov, A.Y. Sharaevskaya, E.N. Beginin, A.V. Sadovnikov, A.I. Stognij, D.V. Kalyabin, S.A. Nikitov. J. Magn. Magn. Mater., **476**, 423 (2019). DOI: 10.1016/j.jmmm.2018.12.008
[15] A.I. Chernov, M.A. Kozhaev, D.O. Ignatyeva, E.N. Beginin, A.V. Sadovnikov, A.A. Voronov, D. Karki, M. Levy, V.I. Belotelov. Nano Lett., **20**, 5259 (2020). DOI: 10.1021/acs.nanolett.0c01528
[16] К.П. Белов. *Редкоземельные магнетики и их применение* (Наука, М., 1980)
[17] В.В. Рандошкин, А.Я. Червоненкис. *Прикладная магнитооптика* (Энергоатомиздат, М., 1990)
[18] А.М. Балбашов. *Элементы и устройства на цилиндрических магнитных доменах*: справочник, под ред. Н.Н. Евтихиева, Б.Н. Наумова (Радио и связь, М., 1987)
[19] А. Эшенфельдер. *Физика и техника цилиндрических магнитных доменов* (Мир, М., 1983). [Пер. с англ. A.H. Eschenfelder. *Magnetic bubble technology* (Springer, 1981)]
[20] Ф.В. Лисовский. *Физика цилиндрических магнитных доменов* (Сов. радио, М., 1979)
[21] С.П. Зимин, И.И. Амиров, В.В. Наумов, М.С. Тиванов, Л.С. Ляшенко, О.В. Королик, E. Abramof, P.H.O. Rappl. ФТТ, **66** (8), 1408 (2024). DOI: 10.61011/FTT.2024.08.58608.131
[22] М.В. Логунов, С.А. Никитов, А.И. Стогний, С.С. Сафонов, А.Г. Темирязев. Изв. РАН. Серия физ., **83** (7), 950 (2019). DOI: 10.1134/S0367676519070251
[23] С.И. Ющук. ЖТФ, **69** (12), 62 (1999).
[24] В.И. Нецветов, А.И. Коссе, В.В. Щиголев, В.А. Хохлов, Ю.В. Медведев. Электронная обработка материалов, **45** (4), 47 (2009).
[25] Н.И. Цидаева, А.Т. Накусов, С.А. Хайманов, А.К. Хубаев, Л.М. Кубалова, W. Wang. ЖТФ, **90** (2), 289 (2020). DOI: 10.21883/JTF.2020.02.48823.193-19 [N.I. Tsidaeva, A.T. Nakusov, S.A. Khaimanov, A.K. Khubaev, L.M. Kubalova, W. Wang. Tech. Phys., **65** (2), 276 (2020). https://doi.org/10.1134/S1063784220020243]
[26] W.A. Johnson, J.C. North, R. Wolfe. J. Appl. Phys., **44** (10), 4753 (1973). DOI: 10.1063/1.1662031
[27] В.Г. Костишин, А.Т. Морченко, Д.Н. Читанов, В.М. Трухан. Материалы электронной техники, **3**, 29 (2012).
[28] A.A. Voronov, D.O. Ignatyeva, D. Karki, M.A. Kozhaev, M. Levy, V.I. Belotelov. Thirteenth International Congress on Artificial Materials for Novel Wave Phenomena, 447 (2019). DOI: 10.1109/MetaMaterials.2019.8900842
[29] Г.Ф. Ивановский, В.И. Петров. *Ионно-плазменная обработка материалов* (Радио и связь, М., 1986)
[30] А.Г. Шумилов, А.А. Федоренко, А.С. Недвига, Е.Ю. Семук, И.А. Наухацкий, В.Н. Бержанский, А.Н. Шапошников, С.В. Томилин. (Пат. RU 2 791 730 C1. Заявл. 28.11.2022, опубл. 13.03.2023)
[31] О.А. Томилина, А.А. Сыров, С.В. Томилин, В.Н. Бержанский. Поверхность, **10**, 29 (2022). DOI: 10.31857/S1028096022100156
[32] P.M. Vetoshko, V.A. Skidanov, A.L. Stempkovskiy. Sensor Lett., **11** (1), 59 (2013). DOI: 10.1166/sl.2013.2768
[33] С.А. Юрьев, С.И. Ющук. Приборы и техника эксперимента, **6**, 102 (2013). DOI: 10.7868/S0032816213050236
[34] С.Н. Иванов, М.И. Бичурин, Г.А. Семенов. Вестник НовГУ, **2** (73), 97 (2012).
[35] V.A. Skidanov, P.M. Vetoshko. Procedia Enineering, **5**, 989 (2010). DOI: 10.1016/j.proeng.2010.09.275
[36] П.М. Ветошко, А.К. Звездин, В.А. Скиданов, И.И. Сыворотка, И.М. Сыворотка, В.И. Белотелов. Письма в ЖТФ, **41** (9), 103 (2015).