

УДК 538.911:538.971

ФОРМИРОВАНИЕ МИКРОСТРУКТУР С ЗАДАННЫМ 3D-ПРОФИЛЕМ НА ОСНОВЕ ЭПИТАКСИАЛЬНЫХ ПЛЕНОК РЕДКОЗЕМЕЛЬНЫХ ФЕРРИТ-ГРАНАТОВ МЕТОДОМ ИОННОГО ТРАВЛЕНИЯ

© 2022 г. О. А. Томилина^а, *, А. А. Сыров^а, С. В. Томилин^а, В. Н. Бержанский^а

^аКрымский федеральный университет им. В.И. Вернадского,
Симферополь, 295007 Россия

*e-mail: olga_tomilina@mail.ru

Поступила в редакцию 10.01.2022 г.

После доработки 14.02.2022 г.

Принята к публикации 14.02.2022 г.

Экспериментально изучены возможности формирования заданного гладкого 3D-профиля магнитных микроструктур на основе эпитаксиальных пленок висмут-замещенных феррит-гранатов $(\text{BiY})_3(\text{FeAlGa})_5\text{O}_{12}$ на подложках $\text{Gd}_3\text{Ga}_5\text{O}_{12}$ с помощью ионно-плазменного травления поверхности через маску. Подобные тонкопленочные магнитные микроструктуры применяют при создании сверхчувствительных датчиков магнитного поля с низким уровнем шума при динамическом планарном перемагничивании. Травление поверхности осуществляли ионами Ag^+ в плазме тлеющего высокочастотного разряда. Показано, что при непосредственном контакте маски с поверхностью пленки в процессе ионного травления на краю маски образуется неоднородный плазменный поток, обусловленный статическим зарядом диэлектрической поверхности маски и пленки. Это приводит к формированию сглаженного профиля на краю пленки вблизи границы области травления. При создании зазора между маской и поверхностью пленки сглаженный профиль края пленки вблизи границы области травления формируется вследствие неоднородного распределения плазменного потока за счет эффекта геометрической полутени. Шириной области сглаженного профиля можно управлять в диапазоне от единицы до сотен микрометров за счет изменения высоты зазора между маской и поверхностью пленки.

Ключевые слова: тонкая пленка, феррит-гранат, ионное травление, профиль края, эффект полутени.

DOI: 10.31857/S1028096022100156

ВВЕДЕНИЕ

Для создания высокочувствительных датчиков магнитного поля (порядка фТл) могут быть использованы эпитаксиальные пленки феррит-гранатов, легированные редкоземельными элементами [1–4]. Такие пленки имеют монокристаллическую структуру и обладают высокой степенью структурного совершенства [5–9]. Подобные пленки используют в качестве сенсоров в дефектоскопии, криминалистике, а в последнее время — в магнитокардиографии и магнитоэнцефалографии [1, 10, 11]. Большие значения магнитооптического эффекта Фарадея в пленках на основе Bi-замещенного феррит-граната позволяют не только фиксировать величину магнитного поля, но и визуализировать его распределение [10–12]. Пленки на основе железоиттриевого феррит-граната обладают высокими значениями магнитной восприимчивости и малым затуханием, что позволяет их использовать в магнитомодуляционных сенсорах, обладающих высокой чувствитель-

ностью. Одним из факторов, ограничивающих эффективность динамического перемагничивания таких сенсоров и, как следствие, снижающих чувствительность магнитных сенсоров на их основе, является возникновение краевых доменов вблизи границы пленочного образца. Такие краевые домены при планарном перемагничивании взаимодействуют с приграничными дефектами образца и создают дополнительные шумы. Для снижения влияния краевых доменов 3D-профиль пленочного диска сенсора стремятся сделать максимально гладким, близким к эллипсоидальному [13]. Известна технология формирования квазиэллиптического 3D-профиля методом ступенчатого жидкостного травления в кислотах через маску [14]. Недостатком этой методики является то, что реальный 3D-профиль диска получается не гладкий, а ступенчатый, причем каждая ступенька формируется в результате отдельного цикла фотолитографии с последующим травлением. Огибающая таких ступеней представляет собой полуэллипс. Увеличение количества ступеней поз-

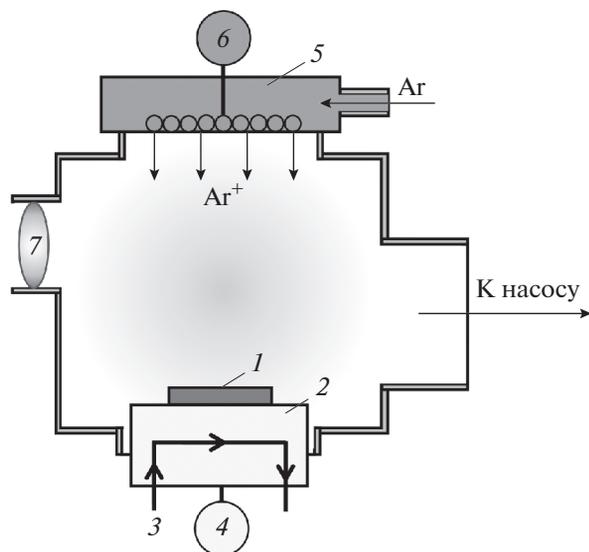


Рис. 1. Схема реакторной камеры вакуумной установки “МВУ ТМ Плазма 06”: 1 – образец; 2 – предметный столик, совмещённый с системой согласования высокочастотного поля смещения; 3 – система охлаждения столика; 4 – независимый источник высокочастотного поля смещения; 5 – высокочастотный генератор плазмы, совмещённый с системой согласования и системой распределения газового натека; 6 – независимый источник высокочастотного поля для генерации плазмы; 7 – окно визуального наблюдения.

воляет приблизиться к форме истинного эллипса, однако ведет к увеличению количества фотолитографических циклов и необходимости более точного позиционирования маски относительно уже сформированных ступеней.

Настоящая работа посвящена исследованию возможности формирования в эпитаксиальных пленках висмут-замещенных феррит-гранатов структур с гладким 3D-профилем с помощью ионно-плазменного травления поверхности через маску. Подобная технология позволяет сформировать структуру с заданным 3D-профилем без ступеней и в течение одного технологического цикла “маскирование–травление”.

МЕТОДИКИ ПРОВЕДЕНИЯ ЭКСПЕРИМЕНТА И АНАЛИЗА РЕЗУЛЬТАТОВ

Образцы эпитаксиальных пленок висмут-замещенного феррит-граната получены методом жидкофазной эпитаксии [15] из раствор-расплава номинального состава $(\text{BiY})_3(\text{FeAlGa})_5\text{O}_{12}$. В качестве подложек использованы пластины толщиной 500 мкм из полированного монокристалла гадолиний-галлиевого граната $\text{Gd}_3\text{Ga}_5\text{O}_{12}$ с ориентацией поверхности (111). Толщина нанесенных эпитаксиальных пленок составляла порядка 150 нм.

Ионное травление осуществляли с использованием вакуумной установки “МВУ ТМ Плазма 06” (НИИ ТМ, Зеленоград) в плазме Ar при давлении 1 Па (остаточное давление атмосферных газов не хуже 5×10^{-3} Па). В этой установке плазма генерируется за счет тлеющего высокочастотного разряда (13.6 МГц). Травление поверхности образца происходит за счет высокочастотного смещения на водоохлаждаемый предметный столик от независимого генератора (13.6 МГц). Общая схема реакторной камеры установки для ионно-плазменного травления показана на рис. 1.

На рис. 2 показана схема процесса формирования гладкого 3D-профиля края пленки. При ионном травлении на поверхность пленки накладывали толстую (порядка 500 мкм) маску из немагнитного диэлектрика (кварц, гадолиний-галлиевый гранат). Ионы аргона при взаимодействии с поверхностью диэлектрика создают наведенный положительный заряд, как показано на рис. 2а [16]. Краевые эффекты на границе маски (в том числе и полевое взаимодействие ионов Ar^+ с наведенным поверхностным зарядом) приводят к искривлению ионного потока и формированию градиента скорости травления. Таким образом, вблизи границы маски формируется край пленки с гладким 3D-профилем.

Ширину области гладкого 3D-профиля края d можно варьировать от единиц до сотен мкм созданием зазора между краем маски и пленкой, как показано на рис. 2б. В данном случае разная скорость травления под маской обеспечивается за счет краевого эффекта геометрической полутени: скорость травления определяется вероятностью проникновения потока плазмы под маску. Изменение высоты зазора изменяет и вероятность проникновения потока плазмы под маску и, как следствие, влияет на ширину области гладкого профиля края d . Подобный метод неоднородного потока ранее уже применяли для создания покрытий с градиентом толщины вдоль выделенного направления. Принцип образования неоднородного потока и формирования геометрической полутени на образце описан в [17, 18].

Следует отметить, что искривление линий ионного тока за счет краевых эффектов приводит к уплотнению плазмы вблизи границы маски. В результате этого сразу за пределами гладкого края пленки возникает углубление в подложке (по отношению к остальной части стравленной поверхности).

Экспериментальный анализ геометрической формы 3D-профиля края пленки осуществляли с помощью микроинтерферометра “Линика МИИ-4” с блоком цифровой обработки. Ширину области гладкого профиля определяли по масштабной шкале в окуляре микроинтерферометра (1 дел. = 30 мкм), высота профиля в точке исследования

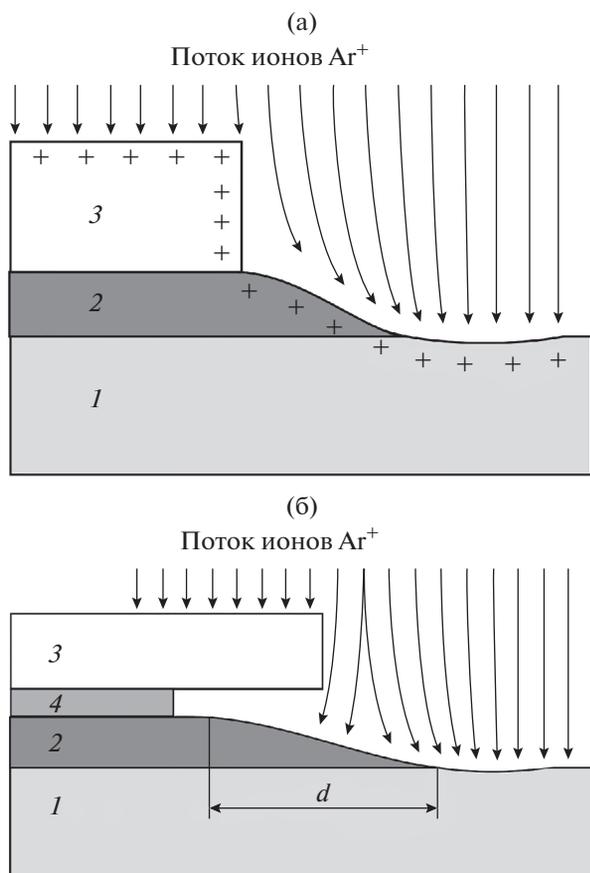


Рис. 2. Схема формирования гладкого 3D-профиля края пленки при расположении маски непосредственно на поверхности пленки (а) и над поверхностью пленки (б): 1 – подложка; 2 – пленка; 3 – маска; 4 – поддерживающая маску вставка фиксированной толщины. Стрелками схематично показано распространение потока ионов аргона в процессе травления, символами “+” обозначен наведенный электростатический заряд на диэлектрической поверхности маски и пленки.

$h(x)$ определяли по сдвигу интерференционной картины по формуле:

$$h(x) = \lambda A(x)/2B, \quad (1)$$

где $A(x)$ – величина сдвига интерференционной картины в точке исследования; B – расстояние между двумя соседними максимумами или минимумами интерференции (период интерференции); λ – длина волны излучения. При исследованиях использовали зеленый светофильтр с длиной волны $\lambda = 532$ нм.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

На рис. 3 представлены результаты исследования формы гладкого профиля края пленки после ионного травления через маску толщиной 500 мкм, когда маску располагали непосредственно на по-

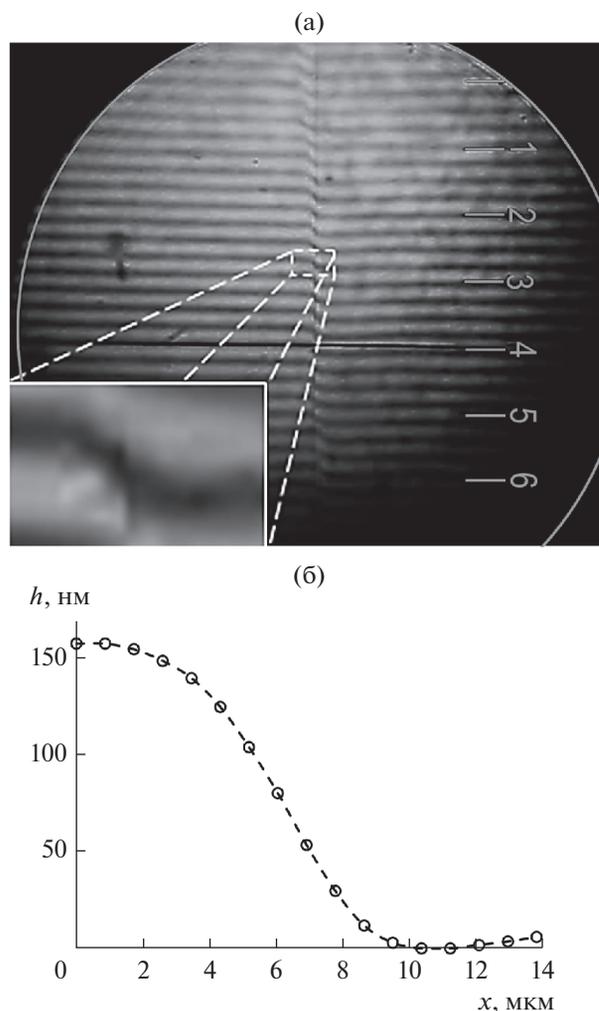


Рис. 3. Снимок интерференционной картины, полученной в монохроматическом излучении ($\lambda = 532$ нм) на границе области травления пленки при расположении маски непосредственно на поверхности пленки (а); форма профиля края пленки (б).

верхности пленки (рис. 2а). На рис. 3а показан вид интерференционной картины при использовании светофильтра ($\lambda = 532$ нм). Отчетливо видно плавное смещение интерференционной картины на краю пленки, что соответствует гладкому 3D-профилю края. Для анализа формы профиля был выбран участок снимка интерференционной картины, который показан на вставке. Результаты анализа в виде зависимости $h(x)$ показаны на рис. 3б. Видно, что при размещении маски толщиной 500 мкм непосредственно на поверхности пленки ширина области сглаженного профиля травления составила порядка 10 мкм при общей глубине травления 160 нм.

Для увеличения ширины области сглаженного профиля травления маска была поднята над поверхностью пленки. На рис. 4 показаны результаты исследования профиля края пленки после

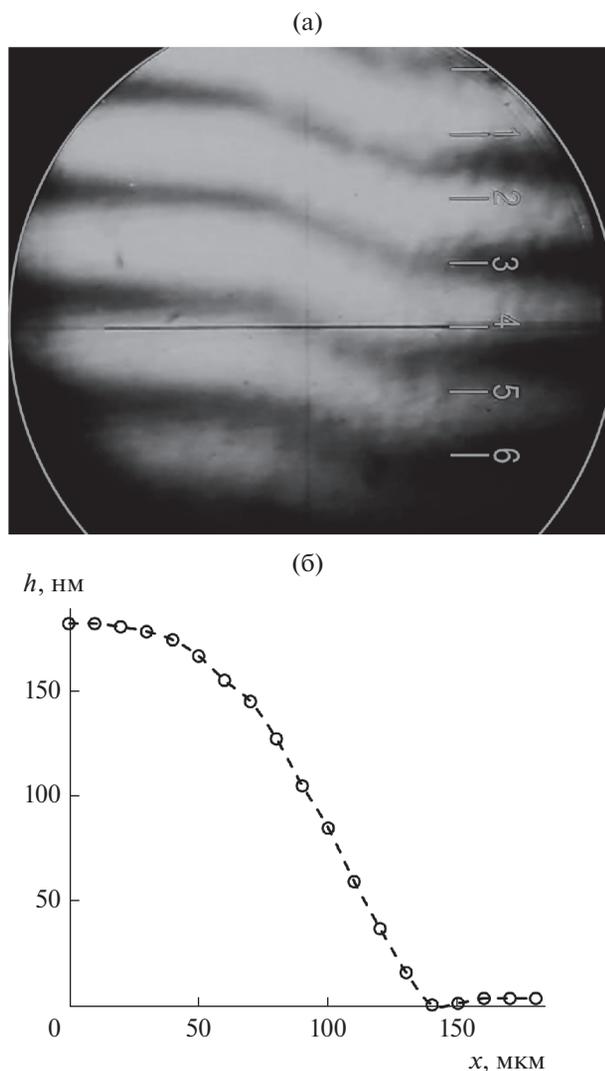


Рис. 4. Снимок интерференционной картины, полученной в монохроматическом излучении ($\lambda = 532$ нм) на границе области травления пленки при расположении маски над поверхностью пленки на фиксированном расстоянии (а); форма профиля края пленки при величине расстояния между маской и пленкой 300 мкм (б).

ионного травления через маску толщиной 500 мкм, когда маску располагали над поверхностью пленки с образованием зазора (рис. 2б). Высота зазора составляла 300 мкм. На рис. 4а продемонстрировано смещение интерференционной картины на краю пленки. Результаты анализа формы профиля края пленки $h(x)$ представлены на рис. 4б. Видно, что толщина пленки на границе зоны травления монотонно уменьшается, формируя гладкий профиль края. Таким образом, при неплотном прилегании маски к поверхности пленки ширина гладкого профиля травления составила порядка 140 мкм при общей глубине травления 180 нм.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе экспериментально показана возможность создания заданного гладкого 3D-профиля края редкоземельных пленок феррит-гранатов с помощью ионного травления через маску в течение одного технологического цикла “маскирование–травление”. Ширина области гладкого профиля края пленки может быть изменена за счет создания регулируемого зазора между маской и пленкой, в этом случае заданный гладкий 3D-профиль формируется за счет разной скорости травления в результате эффекта геометрической полутени. Показано, что при размещении маски толщиной 500 мкм непосредственно на поверхности пленки ширина гладкого профиля травления составила порядка 10 мкм при общей глубине травления 160 нм. При размещении этой же маски на высоте 300 мкм над поверхностью пленки ширина гладкого профиля травления составила порядка 140 мкм при общей глубине травления 180 нм.

БЛАГОДАРНОСТИ

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта РФФИ № 19-72-20154.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Ветошко П.М., Гусев Н.А., Чепурнова Д.А., Самойлова Е.В., Звездин А.К., Коротаева А.А., Белотелов В.И.* // Мед. тех. 2016. № 4(298). С. 15.
2. *Eftekhari H., Tehranchi M.M.* // Optik. 2020. V. 207. P. 163830.
3. *Qin J., Deng L., Xie J., Tang T., Bi L.* // AIP Advances. 2015. V. 5. P. 017118.
4. *Berzhansky V., Mikhailova T., Shaposhnikov A., Prokopov A., Karavainikov A., Kotov V., Balabanov D., Burkov V.* // App. Optics. 2013. V. 52. I. 26. P. 6599.
5. *Касимова В.М., Козлова Н.С., Бузанов О.А., Забелина Е.В., Лагов П.Б., Павлов Ю.С.* // Поверхность. Рентген-, синхротр. и нейтрон. исслед. 2021. № 12. С. 7.
6. *Yiheng R., Dainan Zh., Huaiwu Zh., Lichuan J., Qinghui Y., Zhiyong Z., Mingming L., Caiyun H., Bo M.* // J. Phys. D: App. Phys. 2018. V. 51. № 43. P. 435001.
7. *Prokopov A.R., Vetoshko P.M., Shumilov A.G., Shaposhnikov A.N., Kuzmichev A.N., Koshlyakova N.N., Berzhansky V.N., Zvezdin A.K., Belotelov V.I.* // J. Alloys and Compounds. 2016. № 671. P. 403.
8. *Levy M., Borovkova O.V., Sheidler C., Blasiola B., Karki D., Jomard F., Kozhaev M.A., Popova E., Keller N., Belotelov V.I.* // Optica. 2019. V. 6. № 5. P. 642.
9. *Nur-E-Alam M., Vasiliev M., Belotelov V., Alameh K.* // Nanomaterials. 2018. № 8. P. 355.
10. *Lugovskoy N., Berzhansky V., Glechik D., Prokopov A.* // J. Phys.: Conf. Ser. 2018. № 1124. P. 051063.
11. *Berzhansky V.N., Filippov D.M., Lugovskoy N.V.* // Physics Procedia. 2016. № 82. P. 27.

12. *Yurchenko V.V., Woerdenweber R., Galperin Y.M., Shantsev D.V., Vestgaarden J.I., Johansen T.H.* // *Physica C-Superconductivity and Its Applications*. 2006. № 437. P. 357.
13. *Ветошко П.М., Гусев Н.А., Чепурнова Д.А., Самойлова Е.В., Сыворотка И.И., Сыворотка И.М., Звездин А.К., Коротаева А.А., Белотелов В.И.* // *Письма в ЖТФ*. 2016. Т. 42. Вып. 16. С. 64.
14. *Ветошко П.М., Звездин А.К., Скиданов В.А., Сыворотка И.И., Сыворотка И.М., Белотелов В.И.* // *Письма в ЖТФ*. 2015. Т. 41. Вып. 9. С. 103.
15. *Полулях С.Н., Бержанский В.Н., Семук Е.Ю., Белотелов В.И., Ветошко П.М., Попов В.В., Шапошников А.Н., Шумилов А.Г., Чернов А.И.* // *ЖЭТФ*. 2021. Т. 159. Вып. 2. С. 307.
16. *Старшинов И.Н., Мельничук И.А., Богомолов А.Г.* // *Поверхность. Рентген., синхротр. и нейтрон. исслед.* 2013. № 6. С. 80.
17. *Томилиן С.В., Бержанский В.Н., Яновский А.С., Томилина О.А.* // *Поверхность. Рентген., синхротр. и нейтрон. исслед.* 2016. № 8. С. 96.
18. *Khramova A.E., Ignatyeva D.O., Kozhaev M.A., Dagesyan S.A., Berzhansky V.N., Shaposhnikov A.N., Tomilin S.V., Belotelov V.I.* // *Opt. Express*. 2019. V. 27. № 23. P. 33170.

The Formation of Microstructures with Given 3D-Profile Based on Epitaxial Films of Rare-Earth Iron-Garnet Using the Method of Ionic Etching

O. A. Tomilina^{1, *}, A. A. Syrov¹, S. V. Tomilin¹, V. N. Berzhansky¹

¹*V.I. Vernadsky Crimean Federal University, Simferopol, 295007 Russia*

**e-mail: olga_tomilina@mail.ru*

The possibility of forming a given smoothed 3D-profile of magnetic microstructures based on ferrite-garnet epitaxial $(\text{BiY})_3(\text{FeAlGa})_5\text{O}_{12}$ films on $\text{Gd}_3\text{Ga}_5\text{O}_{12}$ substrates by ionic-plasma etching of the surface with mask has been experimentally investigated. Such thin-film magnetic microstructures are used to create ultra-sensitive magnetic field sensors with a low noise level at dynamic planar remagnetization. The surface etching was carried out using Ar^+ ions in a high-frequency glow discharge plasma. It was shown, that when the mask was applied on the film surface during ion etching an inhomogeneous plasma flow was formed at the edge of the mask, which due to the static charging of the dielectric surface of the mask and film. It leads to the formation of a smoothed profile at the edge of the film near the boundary of the etching area. When creating a gap between the mask and the film surface, the smoothed profile of the film edge near the boundary of the etching area was formed by the inhomogeneous distribution of the plasma flow due to the effect of geometric half-shadow. The width of the smoothed profile area can be controlled in the range from several to hundreds of micrometers by changing the height of the gap between the mask and the film surface.

Keywords: thin films, iron garnet, ion etching, edge profile, penumbra effect.