

УДК 537.622

ЭВОЛЮЦИЯ ПЕТЕЛЬ ГИСТЕРЕЗИСА ПЛЕНОК ФЕРРИТОВ-ГРАНАТОВ ПРИ ГЛУБОКОМ ПОСЛОЙНОМ ТРАВЛЕНИИ

© 2019 г. М. В. Логунов^{1, *}, С. А. Никитов^{1, 2}, А. И. Стогний³,
С. С. Сафонов¹, А. Г. Темиряев⁴

¹Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт радиотехники и электроники имени В.А. Котельникова Российской академии наук, Москва, Россия

²Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования “Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет)”, Долгопрудный, Россия

³Государственное научно-производственное объединение “Научно-практический центр по материаловедению Национальной академии наук Беларуси”, Минск, Белоруссия

⁴Фрязинский филиал федерального государственного бюджетного учреждения науки Института радиотехники и электроники имени В.А. Котельникова Российской академии наук”, Фрязино, Россия

*E-mail: logunov@cplire.ru

Поступила в редакцию 07.09.2018 г.

После доработки 31.01.2019 г.

Принята к публикации 27.03.2019 г.

Исследованы зависимости параметров петель гистерезиса монокристаллических пленок ферритов-гранатов от толщины пленок в результате послойного травления пленок методом ионно-лучевого распыления пучком ионов кислорода. Показано, что коэрцитивная сила пленок в области магнитных полей, соответствующих движению доменных границ, в результате послойного травления до 90% толщины пленок не превышает 0.6 Э, что важно при использовании пленок в устройствах на базе доменных границ и других наноразмерных спиновых структур.

DOI: 10.1134/S0367676519070251

При разработке устройств спинтроники необходимо использовать различные приемы для обработки и модификации поверхности пленок, входящих в гибридные гетероструктуры. Особый интерес представляет получение 3D структур с разнообразными свойствами [1, 2]. В этом случае возникает необходимость формирования пленок с заданным профилем толщины и, как правило, ряд параметров пленок при этом зависят от толщины пленки. Для устройств на базе доменных границ и скирмионов [1, 3, 4] на первый план выходят задачи формирования однородных пленок с малой коэрцитивной силой, что необходимо для снижения эффектов закрепления при движении доменных границ и других наноразмерных спиновых структур.

В данной работе представлены результаты изучения зависимостей параметров петель гистерезиса монокристаллических пленок ферритов-гранатов от толщины пленок при послойном травлении вплоть до полного стравливания пленки. Использовали два метода травления пленок — в растворе кислот [5, 6] (варьировали состав и температуру раствора) и ионно-лучевое распыле-

ние поверхности пленок ионами кислорода [7, 8] (варьировали энергию ионов кислорода и плотность тока пучка). Первый метод использовали для небольшой коррекции толщины пленок, так как при значительной глубине травления наблюдался рост плотности дефектов.

Для глубокого анизотропного травления пленок ферритов-гранатов применяли метод медленного ионно-лучевого распыления пучком ионов кислорода [7], модифицированный для задач вплоть до полного стравливания пленок микронных толщин на подложке [8]. Как результат модификации метода рельеф исходной поверхности в процессе распыления становится более гладким и менее дефектным по сравнению с исходным состоянием. В условиях медленного распыления обеспечиваются режимы, когда глубина дефектного слоя, нарушенного облучением пучком ионов кислорода, сопоставима с постоянной решеткой феррита-граната и не превышает толщину естественного нарушенного поверхностного слоя ростовой и релаксирующей природы происхождения, которая превышает по размерам две-три постоянные решетки феррита-граната.

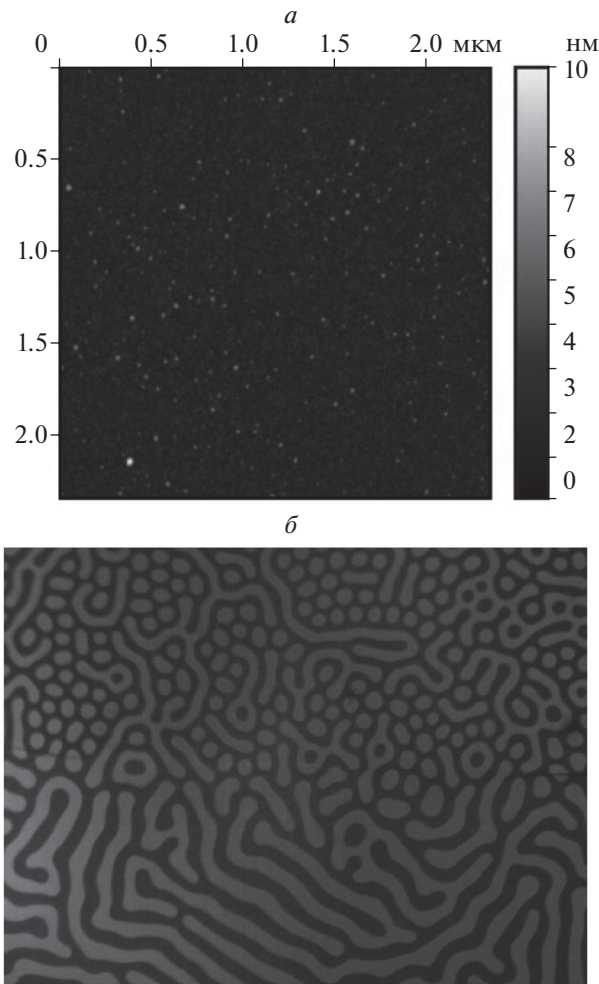


Рис. 1. *a* – Область пленки феррита-граната после травления (атомно-силовая микроскопия, $R_{ms} = 0.5$ нм); *б* – доменная структура на стыке двух областей пленки толщиной 3.6 (вверху) и 2.5 мкм (внизу).

В течение одного цикла распыления удаление слоя требуемой толщины производится при предельном вакууме не хуже 0.08 Па и напуске кислорода до рабочего давления не выше 0.12 Па, а толщина удаляемого слоя определяется длительностью цикла. Вначале цикла в течение 20–30 мин облучением пучком ионов кислорода с энергией до 300 эВ и плотностью тока пучка до $0.1 \text{ mA} \cdot \text{cm}^{-2}$ поверхность подготавливается и активируется перед процессом утончения пленки, скорость распыления пленки при этом незначительна. На основном этапе распыления энергия ионов кислорода увеличивается до 1000 эВ, а плотность тока пучка до $0.25 \text{ mA} \cdot \text{cm}^{-2}$. Скорость распыления при этом составляет примерно 4–5 нм/мин, длительность этапа определяется заданной толщиной снимаемого слоя. На завершающем этапе облучения в течение 20–30 мин пучком ионов кислорода с энергией до 300 эВ и плотностью тока

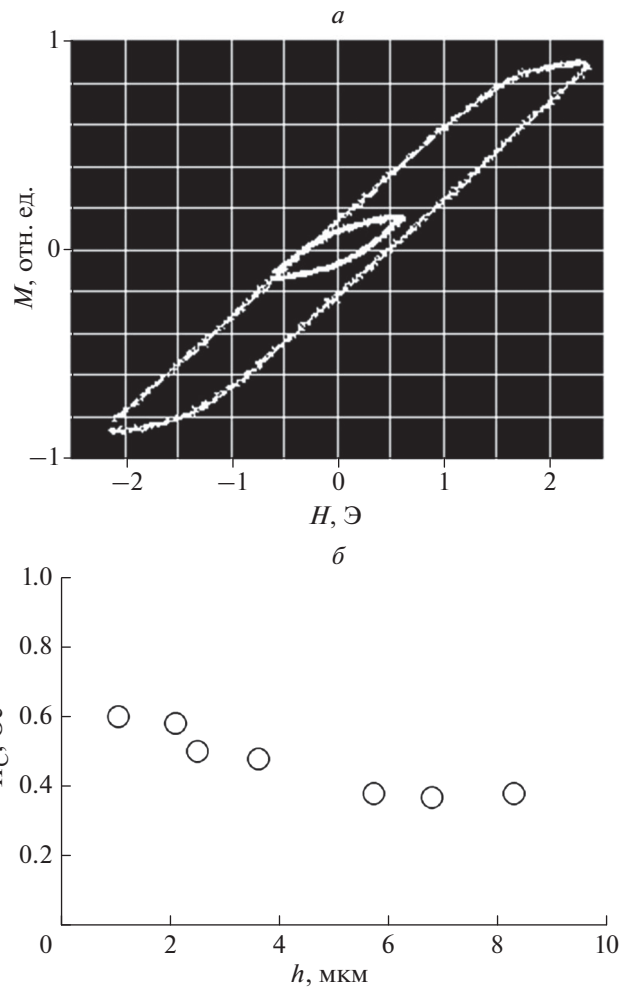


Рис. 2. Петли гистерезиса пленки для максимального магнитного поля $H_{max} = 0.6$ и 2.4 Э (*a*) и изменение коэрцитивной силы пленки H_c при травлении в зависимости от толщины пленки h (*б*).

пучка до $0.1 \text{ mA} \cdot \text{cm}^{-2}$ производится удаление структурно-нарушенного слоя, образованного на предыдущей стадии травления.

Контроль толщины снятого слоя производили при помощи интерференционного микроскопа Линника–Номарски МИИ-4, для более прецизионного контроля анализировали профили травления образцовых структур методом электронной микроскопии на станции с фокусированным ионным пучком FIE 450. Исследование топографии поверхности проводили с помощью атомно-силового микроскопа SmartSPM (AIST-NT). Далее результаты приведены для пленки состава $(\text{Bi,Lu})_3(\text{Fe,Ga,Al})_5\text{O}_{12}$, выращенной методом жидкофазной эпитаксии на подложке $\text{Gd}_3\text{Ga}_5\text{O}_{12}$ с ориентацией (111). Исходная толщина пленки $h = 8.3$ мкм, намагниченность насыщения $4\pi M_s = 97$ Гс, поле одноосной анизотропии $H_k = 5500$ Э [4]. Показано, что среднеквадратичная шерохова-

тость поверхности пленки практически не изменяется и остается на уровне $R_{MS} \sim 0.5$ нм вплоть до стравливания 90% толщины пленки методом медленного ионно-лучевого распыления пучком ионов кислорода (рис. 1а). Поскольку изменение толщины пленки было значительным, равновесные размеры доменов также изменялись в значительной степени, что хорошо видно на границе областей пленки разной толщины (рис. 1б) и соответствует теоретическим зависимостям размеров доменов от толщины пленки [9]. Профиль толщины пленки на границе областей с разной толщиной контролировали с помощью профилометра KLA-TENCOR Alpha-Step 500.

Толщину пленок изменяли послойно, с шагом в несколько процентов от первоначальной толщины пленки. Для каждой толщины пленки регистрировали семейство частных и предельных петель гистерезиса и, таким образом, изучили эволюцию петель гистерезиса пленок при глубоком послойном травлении. Особенностью исследуемой пленки состава $(\text{Bi}, \text{Lu})_3(\text{Fe}, \text{Ga}, \text{Al})_5\text{O}_{12}$ является малая величина коэрцитивной силы $H_c \sim 0.4$ Э для частных петель гистерезиса в небольших магнитных полях $H \leq 10$ Э (рис. 2а), соответствующих процессу изменения намагниченности при движении доменных границ. Благодаря медленному процессу распыления и включению заключительного этапа травления по удалению структурно-нарушенного слоя, в результате послойного травления коэрцитивная сила пленок изменяется незначительно, возрастая от ~ 0.4 Э для исходной пленки до ~ 0.6 Э для пленки толщиной ~ 1 мкм

(рис. 2б; погрешность измерений H_c соответствует размеру маркеров).

Таким образом, метод ионно-лучевого распыления пучком ионов кислорода применим для глубокого послойного травления пленок ферритов-гранатов с сохранением малой коэрцитивной силы пленок, что важно при использовании пленок в устройствах на базе доменных границ и других наноразмерных спиновых структур.

Работа выполнена при поддержке РФФИ, проекты № 18-52-16006 и № 18-29-27020.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Fernandez-Pacheco A., Streubel R., Fruchart O. et al.* // Nat. Commun. 2017. V. 8. P. 15756.
2. *Sadovnikov A.V., Beginin E.N., Odincov S.A. et al.* // Appl. Phys. Lett. 2016. V. 108. Art. № 172411.
3. *Sander D., Valenzuela S.O., Makarov D. et al.* // J. Phys. D. 2017. V. 50. Art. № 363001.
4. *Gerasimov M.V., Logunov M.V., Spirin A.V. et al.* // Phys. Rev. B. 2016. V. 94. Art. № 014434.
5. *Юрьев С.А., Ющук С.И.* // ПТЭ. 2013. № 6. С. 101; *Yur'ev S.A., Yushchuk S.I.* // Instr. Exp. Techn. 2013. V. 56. № 6. P. 741.
6. *Levy M., Chakravarty A., Huang H.-C., Osgood Jr. R.M.* // Appl. Phys. Lett. 2015. V. 107. Art. № 011104.
7. *Pashkevich M., Genieniusz R., Stognij A. et al.* // Thin Sol. Films. 2014. V. 556. P. 464.
8. *Genieniusz R., Gruszecki P., Krawczyk M. et al.* // Sci. Rep. 2017. V. 7. P. 8771.
9. *Звездин А.К., Котов В.А.* Магнитооптика тонких пленок. М.: Наука, 1988. 191 с.