

УДК 537.635

© 1993

ВЛИЯНИЕ ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНОГО ОТЖИГА НА МАГНИТНЫЕ СВОЙСТВА ФЕРРИТ-ГРАНАТОВЫХ ПЛЕНОК, ИМПЛАНТИРОВАННЫХ ИОНАМИ ГЕЛИЯ

В. И. Козлов, Л. П. Осипова

Имплантация феррит-гранатовых пленок ионами гелия привела к нарушению структуры их поверхностного слоя, что в свою очередь вызвало изменение его магнитного состояния. Анализ спектров ферромагнитного резонанса показывает, что с увеличением дозы имплантации анизотропия поверхностного слоя меняет свой характер. По мере отжига пленок в поверхностном слое идут процессы релаксации структурных изменений, сопровождающиеся восстановлением в нем ферри-магнитного упорядочения и возвращением анизотропии типа «легкая ось», присущей пленке первоначально.

Феррит-гранатовые пленки благодаря возможности создания в них подвижных цилиндров доменов (ЦМД) широко используются при создании запоминающих устройств [1]. Серьезной проблемой при этом является возникновение в пленке так называемых «жестких» ЦМД, препятствующих нормальной циркуляции информации в элементе памяти. Оказалось, что жесткие ЦМД не возникают, если поверхностный слой пленки обладает анизотропией типа «легкая плоскость» в отличие от анизотропии типа «легкая ось», присущей самой пленке. Один из способов создания такого слоя — имплантация в поверхностный слой пленки различных ионов.

В настоящей работе методом ферромагнитного резонанса (ФМР) исследовано магнитное состояние пленок состава $\text{Eu}_{1.4}\text{Lu}_{0.7}\text{Ca}_{0.3}\text{Ge}_{0.9}\text{Fe}_{4.1}\text{O}_{12}$, эпитаксиально выращенных на подложках из галлий-гадолиниевого граната ориентации (111). Толщина пленок 0.98 и 1.76 мкм. Пленки имплантированы ионами гелия и затем подвергнуты отжигу. Доза имплантации составляла (2; 4; 6; 8) · 10¹⁵ ионов · см⁻² при энергии 164 кэВ. Отжиг проводился при температурах вплоть до 900 °С. ФМР наблюдался на частоте 9.24 ГГц до и после отжига.

В спектрах ФМР этих пленок, так же как и некоторых других при имплантации или облучении, обнаружен дополнительный пик [2, 3]. При ориентации внешнего магнитного поля \mathbf{H} в плоскости пленки ($\Theta(\mathbf{H}, \mathbf{n}) \neq 90^\circ$, где \mathbf{n} — нормаль к пленке) дополнительный пик расположен в более низком магнитном поле относительно главного (рис. 1, а), а при перпендикулярной ($\Theta(\mathbf{H}, \mathbf{n}) = 0^\circ$) — в более высоком (рис. 1, б). При изменении угла Θ дополнительный пик плавно перемещается в спектре из одного крайнего положения в другое (главный — то же). Такое поведение дополнительного пика позволяет связать его появление с образовавшимся в пленке имплантированным слоем, обладающим анизотропией, отличной от анизотропии основной части пленки. С ростом дозы имплантации дополнительный пик удаляется от главного, и при некоторой дозе его положение становится таким, что указывает на изменение знака константы анизотропии имплантированного слоя, т. е. появление в этом слое анизотропии типа «легкая плоскость».

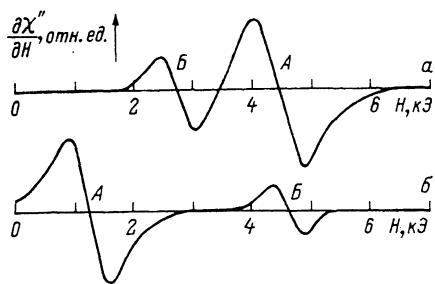


Рис. 1. Спектры ФМР пленки, имплантированной дозой $8 \cdot 10^{15}$ ионов $\cdot \text{см}^{-2}$, при $\Theta(H, n) = 90^\circ$ (а) и $\Theta(H, n) = 0^\circ$ (б).

А — пик от основной части пленки, Б — пик от поверхностного слоя.

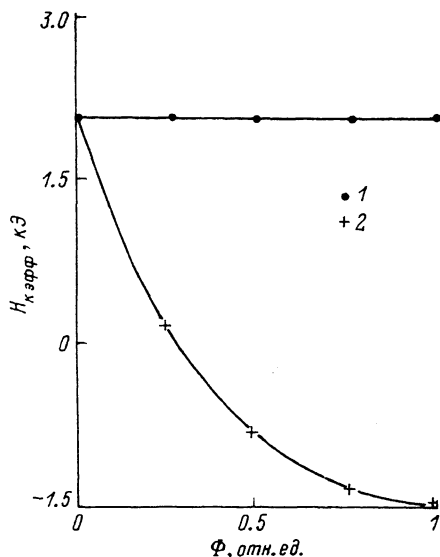


Рис. 2. Зависимость эффективного поля анизотропии основной части пленки (1) и поверхностного слоя (2) от величины дозы имплантации Φ .

Дополнительные пики в спектрах ФМР наблюдались нами для всех имплантированных образцов. Следовательно, уже минимальная доза имплантации приводит к формированию поверхностного слоя, отличающегося от основной части пленки внутренним магнитным полем, величина которого определяется в основном намагниченностью и анизотропией. С другой стороны, наличие дополнительного пика в спектре пленки, имплантированной максимальной дозой, указывает на сохранение ферромагнитного упорядочения и при столь сильном разрушении кристаллической решетки поверхностного слоя, которое имеет место при дозе $8 \cdot 10^{15}$ ионов $\cdot \text{см}^{-2}$.

На рис. 2 представлена зависимость эффективного поля анизотропии $H_{k \text{ эфф}}$ соответственно основной части пленки и имплантированного слоя от дозы имплантации. Величина $H_{k \text{ эфф}}$ рассчитана по положению в спектре пиков А и Б (рис. 1) [4]. Здесь под эффективным полем анизотропии подразумевается комбинация

$$H_{k \text{ эфф}} = H_{ки} - 4\pi M, \quad (1)$$

где $H_{ки} = 2K_i/M$ — эффективное поле одноосной анизотропии с константой K_i , M — намагниченность слоя (или пленки). Анизотропия, присущая основной толще пленки, естественно, не изменяется, а анизотропия поверхностного слоя оказывается очень чувствительной к имплантации. При дозе, превышающей $2 \cdot 10^{15}$ ионов $\cdot \text{см}^{-2}$, анизотропия поверхностного слоя меняет знак. При дозе $8 \cdot 10^{15}$ ионов $\cdot \text{см}^{-2}$ наблюдается подход к насыщению в изменении анизотропии поверхностного слоя.

Имплантация создает в пленке различные дефекты — вакансии, внедрения, скопления точечных дефектов. Характер дефектов, их распределение в имплантированном слое существенно зависят от величины потока, энергии и типа внедряемых ионов. При небольших дозах имплантации кристаллическая решетка

имплантированного слоя деформируется в направлении, перпендикулярном поверхности пленки, что приводит к появлению напряжений в имплантированном слое. Именно эти напряжения обуславливают возникновение анизотропии типа «легкая плоскость». В ряде работ показано, что напряжения в имплантированном слое распределены неравномерно по толщине с максимумом, глубина которого зависит от условий имплантации [5]. Наличие дефектов и связанных с ними напряжений приводит к изменению по толщине имплантированного слоя и магнитного состояния. В частности, меняются по глубине имплантированного слоя константа анизотропии K_u и намагниченность насыщения M . При этом на глубине, где напряжения максимальны, наблюдается максимальное уменьшение намагниченности (на 55 %) по сравнению с исходным значением [6].

Сдвиг дополнительного пика по полю с увеличением дозы имплантации сопровождается немонотонным изменением его амплитуды, что также указывает на сложность изменений, происходящих в кристаллической структуре и магнитном состоянии поверхностного слоя пленки.

Дополнительную информацию об имплантированном слое дают исследования пленок после их отжига. Последний проводился при температурах 100 — 900 °С со ступенью изменения 100 °С. При каждой заданной температуре пленка выдерживалась столь долго, сколько было необходимо для стабилизации ее нового состояния, о чем можно судить по прекращению изменения спектра ФМР. Анализ спектров, полученных после отжига пленок при разных температурах, показывает, что с повышением температуры отжига дополнительный пик смещается к главному при обеих ориентациях внешнего магнитного поля относительно плоскости пленки ($\Theta(H, n) = 0^\circ$) и ($\Theta(H, n) = 90^\circ$). Хорошо заметным этот сдвиг становится при температуре отжига 400 °С. Такое поведение дополнительного пика свидетельствует о восстановлении разрушенной кристаллической структуры имплантированного слоя, уменьшении напряжений, что, естественно, ведет к уменьшению анизотропии типа «легкая плоскость», восстановлению анизотропии типа «легкая ось» и приближению константы анизотропии основной части пленки.

На рис. 3 представлена зависимость эффективного поля анизотропии имплантированного слоя и основной части пленки после отжига при разных температурах. На последнем этапе отжига слегка меняется анизотропия основной части пленки. О том, что делается при этом в имплантированном слое, судить трудно, так как дополнительный пик «тонет» в главном.

Большой интерес представляет изменение амплитуды дополнительного пика с отжигом. На основании известной связи [4]

$$\chi'' \cdot 2\Delta H = 4\pi M, \quad (2)$$

где мнимая часть комплексной магнитной восприимчивости χ'' характеризует амплитуду резонансной кривой в виде $\chi''(H)$, ширина которой $2\Delta H$, можно записать

$$U \cdot 2\Delta H \sim 4\pi MV, \quad (3)$$

U — амплитуда резонансного сигнала, V — объем слоя.

Радиоспектрометр с двойной модуляцией магнитного поля, используемый нами, регистрирует сигнал в виде производной резонансной кривой

$$U_c \sim \partial \chi''(H) / \partial H. \quad (4)$$

В этом случае, если форма резонансной кривой близка к лоренцевой, соотношение (3) приобретает вид

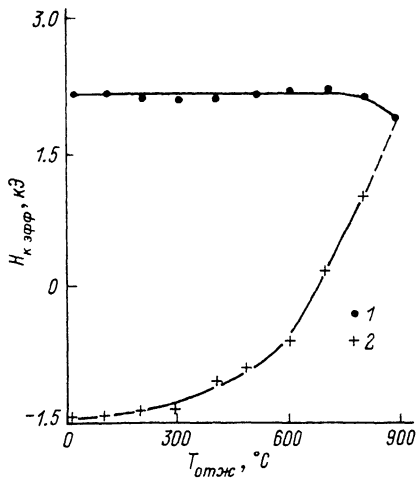


Рис. 3. Зависимость эффективного поля анизотропии основной части (1) и поверхностного слоя (2) пленки, имплантированной дозой $8 \cdot 10^{15}$ ионов $\cdot \text{см}^{-2}$, от температуры отжига.

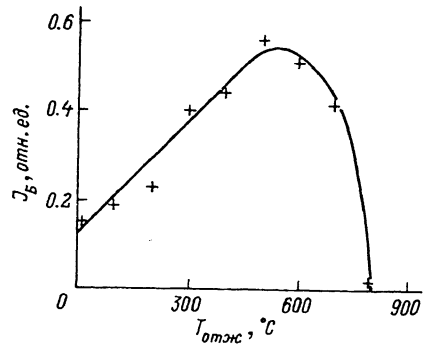


Рис. 4. Зависимость амплитуды дополнительного пика в спектре пленки, имплантированной дозой $8 \cdot 10^{15}$ ионов $\cdot \text{см}^{-2}$, от температуры отжига.

$$U_c(2\delta H_{pp})^2 \sim 4\pi MV, \quad (5)$$

где $2\delta H_{pp}$ — ширина сигнала в виде производной резонансной кривой между его экстремальными точками (form pick to pick).

На рис. 4 представлена зависимость комбинации, стоящей в левой части последнего соотношения и относящейся к дополнительному пику, в единицах аналогичной комбинации для главного пика от температуры отжига. Представленная величина

$$J_B = \frac{[U_x(2\delta H_{pp})^2]_B}{[U_c(2\delta H_{pp})^2]_A}, \quad (6)$$

таким образом, содержит информацию о намагниченности и объеме (толщине) имплантированного слоя. Возрастание величины J_B с отжигом при температурах вплоть до 600°C (рис. 4) может быть вызвано как уменьшением анизотропии типа «легкая плоскость», так и возрастанием намагниченности имплантированного слоя, а также увеличением толщины этого слоя, в пределах которой с отжигом восстанавливается ферромагнитное упорядочение вместо парамагнитного, которое, по-видимому, имело место в результате имплантации [7]. Выяснение роли каждого из этих механизмов требует дополнительных исследований.

Пик в спектре ФМР, обусловленный малыми дозами имплантации, с отжигом сливается с главным при более низкой температуре. Дополнительный пик на пленке, получившей дозу $2 \cdot 10^{15}$ ионов $\cdot \text{см}^{-2}$, сливается с главным после отжига при температуре 700°C , в то время как дополнительные пики в пленках, имплантированных большими дозами, при этом еще хорошо разрешены. Этот экспериментальный факт позволяет сделать вывод, что при малых дозах дефектов не только меньше, но они не столь велики и менее термостойки, чем при больших дозах. Они отжигаются легче при более низких температурах. В связи с этим можно предположить, что основной причиной появления анизотропии типа «легкая плоскость» является образование достаточно крупных дефектов,

искажений кристаллической матрицы и связанных с ними напряжений в пленке. Очевидно, что с ростом дозы имплантации степень дефектности пленки и термостабильность этих дефектов возрастают, а процесс отжига пленки, имплантированной малой дозой, идет быстрее. В пленках с большой дозой имплантации при отжиге могут иметь место и термостимулированные явления (например, образование ионов Fe^{2+} и связанных с ними магнитных дефектов, которые также могут способствовать появлению анизотропии типа «легкая плоскость»). Эти явления могут сказаться и на интенсивности дополнительного пика. Ковенным доказательством существования таких процессов является рост относительной интенсивности дополнительного пика с увеличением температуры отжига.

Почти полное восстановление спектров ФМР происходит лишь при температуре отжига $800^\circ C$ и выше. Столь высокие температуры отжига свидетельствуют о наличии в имплантированном слое аморфизированных областей и связанных с ними искажений кристаллической решетки, что согласуется с результатами исследований других кристаллических объектов, подвергнутых действию радиации, имплантации и последующего отжига при различных режимах.

Спектры ФМР содержат информацию и о более тонких изменениях в структуре и магнитном состоянии имплантированного слоя, не сводящихся к почти обратимому изменению намагниченности и анизотропии. При смещении дополнительного пика по мере отжига на его месте появляется другой, выраженный менее четко, но остающийся неизменным по положению и интенсивности вплоть до отжига при самой высокой температуре. Кроме того, в ряде пленок наблюдается серия небольших узких пиков, свидетельствующих или о более тонкой структуре имплантированного слоя или о возбуждении в нем спектра стоячих спиновых волн обменного или магнитостатического типа [9].

На рисунках представлены результаты, полученные при исследовании серии пленок толщиной 1.76 мкм . Пленки толщиной 0.98 мкм ведут себя подобным же образом, отличаясь от более толстых лишь меньшей анизотропией.

Список литературы

- [1] Рандошкин В. В., Червоненкис А. Я. Прикладная магнитооптика. М., 1990. 318 с.
- [2] Зайончковский В. С., Козлов В. И., Николаев Е. И., Борисов Б. Г. // ФТТ. 1982. Т. 25. № 1. С. 9—14.
- [3] Kraft C. S., Wang X., Kryder M. H. // IEEE Trans. Magn. 1982. V. 18. N 6. P. 1283—1285.
- [4] Гуревич А. Г. Магнитный резонанс в ферритах и антиферромагнетиках. М., 1973. 591 с.
- [5] De Roode W. H., Algra H. A. // J. Appl. Phys. 1982. V. 53. N 3. Part 2. P. 2507—2509.
- [6] Algra H. A., De Roode W. H. // J. Appl. Phys. 1982. V. 53. N 7. P. 5131—5135.
- [7] Komenou K., Zebrowski J., Wilts C. H. // J. Appl. Phys. 1979. V. 50. N 8. P. 5442—5445.
- [8] Gerard P., Madore M., Suran G. // IEEE Trans. Magn. 1982. V. 18. N 6. P. 1274—1279.
- [9] Тихонов В. В., Толкачев А. В., Остафийчук Б. К. // Письма в ЖТФ. 1991. Т. 17. № 15. С. 49—52.