

05.1; 05.2

© 1990

СТРУКТУРНОЕ И МАГНИТНОЕ РАЗУПОРЯДОЧЕНИЕ
В ИМПЛАНТИРОВАННЫХ ИОНАМИ АЗОТА ПЛЕНКАХ
ЖЕЛЕЗО-ИТТРИЕВОГО ГРАНАТА ДО И ПОСЛЕ ОТЖИГАБ.К. Остафийчук, В.М. Пылыпив,
В.А. Олейник, Б.Г. Семен,
П.С. Костюк, Б.И. Яворский

В работе исследовались монокристаллические пленки $Y_3Fe_5O_{12}$ (ЖИГ), выращенные методом жидкофазной эпитаксии на подложке $Gd_3Ga_5O_{12}$ с кристаллографической плоскостью среза (111) и имплантированные ионами ^{15}N с энергией 80 кэВ в пределах доз $1.5 \cdot 10^{14} - 1.2 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-2}$. Отжиг имплантированных пленок проводился при температуре 950°C в атмосфере кислорода в течение 5 часов.

Цель работы - изучение закономерностей радиационного дефектообразования, степени структурного и магнитного разупорядочения в пленках ЖИГ в зависимости от дозы внедренных ионов азота до и после отжига. Исследования выполнены методами рентгеноструктурного анализа и электронографии [1], конверсионной электронной мессбауэровской спектроскопии [2] и резерфордовского обратного рассеивания (РОР) ионов гелия и протонов [3].

Анализ и математическая обработка результатов исследований позволили заключить, что исходная пленка ЖИГ имеет довольно совершенную кристаллическую структуру. В результате ионной имплантации азота в приповерхностном слое ЖИГ образуются как точечные, так и протяженные радиационные дефекты, концентрация которых становится значительной уже при дозе $1.5 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-2}$ и, как следует из электронограмм, при данной дозе наблюдается аморфизация приповерхностного слоя толщиной, превышающей глубину дифракции электронов. С ростом дозы внедренных ионов азота происходит также увеличение постоянной решетки с достижением максимального значения, соответствующего дозе $6 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-2}$, что согласуется с результатами работы [4], и увеличение толщины сильно разупорядоченного приповерхностного слоя, что находит косвенное подтверждение в мессбауэровских спектрах железа, приведенных на рис. 1. Используя методику обработки спектров РОР, описанную в [5], были определены профиль дефектов и степень аморфизации в имплантированной пленке ЖИГ с дозой $1.5 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-2}$, из которых следует, что разрушения катионной подрешетки существуют до глубины порядка 160 нм. При этом приповерхностный слой толщиной порядка ~ 120 нм полностью аморфизирован. Однако с дальнейшим увеличением концентрации внедренного азота процесс аморфизации ЖИГ происходит достаточно медленно, что, по-видимому,

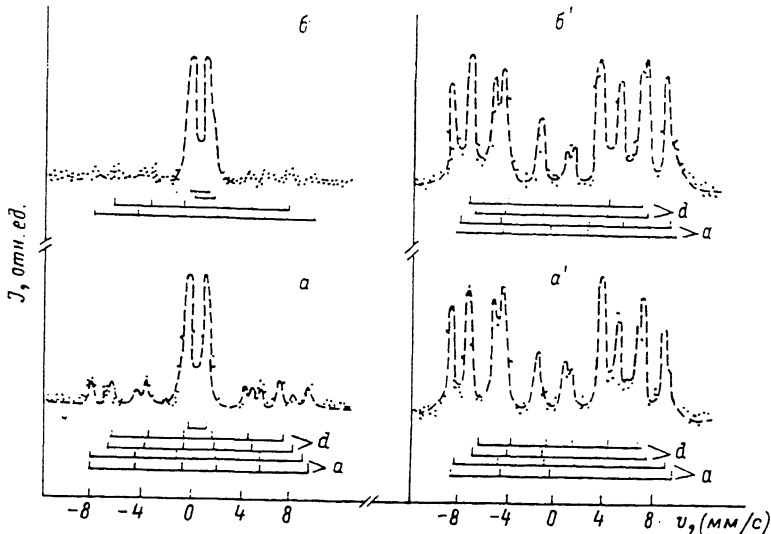


Рис. 1. Конверсионные электронные мессбауэровские спектры (КЭМС) железа, полученные от пленок ЖИГ, имплантированных ионами азота с энергией 80 кэВ и дозами $6 \cdot 10^{14}$ (а, а') и $9 \cdot 10^{14}$ см $^{-2}$ (б, б') до (а, б) и после (а', б') термического отжига в атмосфере кислорода.

обусловлено характером зависимости дефектообразования от дозы ионов азота при данных режимах имплантации. Толщина нарушенного слоя, определенная рентгеновским методом, порядка ~ 80 нм. Учитывая, что приповерхностный аморфный слой при использованной геометрии съемок „прозрачен“ для рентгеновских лучей, толщина нарушенного слоя ЖИГ, имплантированного с дозой $1.5 \cdot 10^{14}$ см $^{-2}$, составляет ~ 200 нм, что согласуется с глубиной залегания внедренного азота.

Используя результаты измерений выхода γ -квантов из реакции $^{15}\text{N} / p, \alpha \gamma / ^{12}\text{C}$ в области резонанса $E_R = 898$ кэВ, были определены местоположение и профиль концентрации имплантированного азота. Последний для дозы $1.2 \cdot 10^{15}$ см $^{-2}$ характеризуется величиной проецированного пробега $R_p = (140 \pm 5)$ нм и дисперсией $\Delta R_p = (90 \pm 5)$ нм. Из соотношения экспериментальных и расчетных ширин кривых угловой зависимости выхода γ -квантов определено, что имплантированные ионы азота в основном занимают узлы анионной подрешетки, что обусловлено, по-видимому, соседством азота и кислорода в периодической таблице элементов. Обращает на себя внимание наличие сдвига минимума кривой угловой зависимости выхода γ -квантов ядерной реакции и кулоновского рассеяния

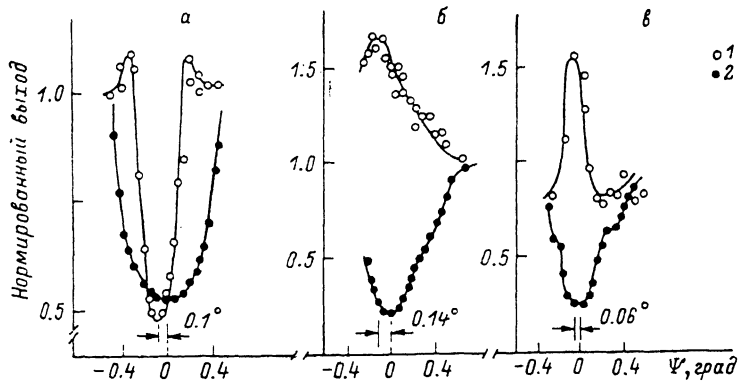


Рис. 2. Угловые зависимости выхода обратно рассеянных протонов от матрицы (1) и γ -квантов реакции $^{15}\text{N}/\rho, \alpha\gamma/^{12}\text{C}$ от имплантированных ионами $^{15}\text{N}^+$ пленок ЖИГ с энергией 80 кэВ: а) $\mathcal{D} = 9 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-2}$, б) $\mathcal{D} = 1.2 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-2}$ после отжига, в) $\mathcal{D} = 1.5 \cdot 10^{14}$ после отжига.

протонов относительно друг друга (рис. 2). Возможно, эффект указанного сдвига связан с отклонением кристаллографических плоскостей (111) от строгой параллельности, обусловленным разворотом катионных цепочек на небольшой угол вследствие ионной имплантации, что следует также из результатов электронографических исследований. Однозначная интерпретация наблюдаемого сдвига затруднена, но экспериментально он установлен также и для феррит-гранатовых пленок, имплантированных ионами бора [6], и имеет близкие значения для аналогичных доз.

Наблюдаемые структурные превращения обуславливают существенные изменения магнитной микроструктуры и находят свое проявление в мессбауэровских спектрах железа. В качестве примера на рис. 1, а, б, приведены КЭМС железа для „средних“ доз, из анализа которых следует, что с увеличением дозы в имплантированном слое происходит уменьшение эффективных магнитных полей на ядрах ^{57}Fe и рост объемной концентрации парамагнитной фазы в результате уменьшения степени сверхобменного взаимодействия между ионами железа в а- и d-подрешетках [7]. Исходя из того факта, что основной выход электронов конверсии происходит из глубин до 2000 нм [8], и в мессбауэровских спектрах железа, полученных от имплантированных ЖИГ с дозой $1.2 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-2}$, наблюдаются малоинтенсивные секстиплеты, соответствующие магнитоупорядоченному состоянию железа, можно заключить, что аморфизация приповерхностного слоя ЖИГ начинается с поверхности и распространяется вглубь с увеличением дозы ИИ. Это утверждение согласуется с результатами электронографии и РОР.

Изотермический отжиг имплантированных пленок ЖИГ не приводит полному восстановлению кристаллической и магнитной структуры, и при высоких дозах ИИ остается значительная концентрация протяженных радиационных дефектов. В результате отжига происходит видоизменение профиля концентрации внедренного азота. Наблюдается смещение максимума распределения $R_p = (100 \pm 5)$ нм к поверхности, увеличение дисперсии $\Delta R_p = (110 \pm 5)$ нм и асимметрии профиля: более крутой передний фронт и более пологий и затянутый вглубь задний фронт по сравнению с профилем имплантации до отжига. Такое незначительное перераспределение внедренного азота в результате столь длительного высокотемпературного отжига свидетельствует о малом значении коэффициента диффузии азота в кристаллах ЖИГ. По-видимому, диффузия азота происходит вдоль дефектов решетки, образованных во время имплантации.

На основании анализа кривой угловой зависимости выхода γ -квантов реакции $^{15}\text{N}/\rho, \propto \gamma / ^{12}\text{C}$ (рис. 2, б) установлено, что в результате отжига внедренный азот переходит из узлов в межузлия, что, очевидно, связано с минимизацией потенциальной энергии внедренного азота в кристаллической решетке ЖИГ. Характерно, что относительный сдвиг кривых выхода γ -квантов ядерной реакции и кулоновского рассеяния протонов наблюдается в имплантированных структурах ЖИГ и после отжига [9], т.е. данные искажения кристаллической структуры, генерируемые во время ионной имплантации, являются термически устойчивыми по отношению к выбранному режиму отжига.

Судя по КЭМС железа (рис. 1, а, б), в процессе отжига происходит упорядочение магнитной структуры, обусловленное рекристаллизацией аморфного слоя и частичным отжигом дефектов. Однако по сравнению с мессбауэровскими спектрами от неимплантированной пленки ЖИГ имеет место расщепление и уширение каждого спектра, соответствующего положению ионов железа в α - и α' -позициях, на составляющие. Указанные изменения и наблюдаемые увеличения величины химсдвига КЭМС железа от отожженных имплантированных ЖИГ по сравнению с неотожженными свидетельствуют о локальных искажениях в области ионов железа, обусловленных переходом азота из узлов в межузлия и остаточными термостабильными дефектами.

Таким образом, изотермический отжиг в атмосфере кислорода вызывает рекристаллизацию аморфного слоя и частичный отжиг дефектов, перераспределение внедренной примеси из анионных узлов в межузлия и ее диффузию к поверхности пленки ЖИГ. Ионы железа из парамагнитного состояния переходят в магнитоупорядоченное состояние. Протяженные дефекты являются термически устойчивыми по отношению к выбранному режиму отжига.

Авторы выражают искреннюю благодарность В.Г. Барьяхтару, В.В. Неможкаленко и Н.А. Скакун за поддержку в проведении настоящих исследований.

- [1] Немошкаленко В.В., Остафийчук Б.К., Пылыпив В.М., Сенкевич А.Н., Федорив В.Д., Торчун Н.М. // ДАН УССР. Сер. А. 1988. № 6. С. 45-48.
- [2] Остафийчук Б.К., Пылыпив В.М., Шевчук П.И., Федорив В.Д., Волженская Л.Г., Петров В.Е. // Металлофизика. 1987. Т. 9. № 4. С. 75-78.
- [3] Скакун Н.А., Дикий Н.П., Матяш П.П., Страшинская А.Г. // ПТЭ. 1973. № 4. С. 49-50.
- [4] Zhang S.M., Zhang S.J., Guo X.U. // IEEE Trans. Magn. 1983. V. MAG-19. N 5. P. 1826-1828.
- [5] Ziegler I.E. // J. Appl. Phys. 1972. V. 43. P. 2971-2975.
- [6] Немошкаленко В.В., Остафийчук Б.К., Олейник В.А., Федорив В.Д. // Письма в ЖТФ. 1989. Т. 14. В. 23. С. 33-35.
- [7] Башкиров Ш.Ш., Ивойлов Н.Г., Романов Е.С. // ФТТ. 1985. Т. 27. № 9. С. 2853-2856.
- [8] Skrimshire C.P., Longworth G., Dearnaley G. // J. Appl. D.: Appl. Phys. 1979. V. 12. N 11. P. 1951-1961.
- [9] Ostafiychuk B.K., Oleynik V.A., Filipiv V.M., Semen B.G., Kostyuk P.S., Tikhonov V.V. // Intern. Sympos. „MASHTEC'90". Dresden, GDR, April 24-27, 1990. Collected Abstracts. V. 2. P. 352-353.

Поступило в Редакцию

27 января 1990 г.

В окончательной редакции

31 мая 1990 г.

Письма в ЖТФ, том 16, вып. 15

12 августа 1990 г.

04

© 1990

О МАГНИТНЫХ ЛОВУШКАХ С „ПЛАВАЮЩИМИ“
В ПЛАЗМЕ ПРОВОДНИКАМИ

А.И. Морозов

В настоящее время в термоядерных исследованиях, за ничтожным исключением, используются ловушки, магнитные поля которых создаются „опертыми о Землю“ проводниками и (или) токами, текущими по плазме. Однако возможности таких систем принципиально ограни-