

Приведенные данные свидетельствуют о возможности использования рассмотренного бесконтактного метода для определения τ тонких диодных структур из кремния (с толщиной 0,3 мкм), широко используемых для изготовления фотопреобразователей.

ЛИТЕРАТУРА

[1] Павлов Л. П. Методы измерения параметров полупроводниковых материалов. М., 1987. [2] Аношин Ю. А., Базин В. М., Даревский А. С. // Гелиотехника. 1989. № 3. С. 3. [3] Mupakata S., Nonaka N., Itoh H. // Japan J. Appl. Phys. 1984. 23. N 6. P. L354. [4] Nonaka N., Mupakata S. // Japan J. Appl. Phys. 1987. 26, N 12. P. 2033. [5] Васильев А. М., Ландсман А. П. Полупроводниковые фотопреобразователи. М., 1971.

Поступила в редакцию
21.06.93

ВЕСТН. МОСК. УН-ТА. СЕР. 3. ФИЗИКА. АСТРОНОМИЯ. 1994. Т. 35, № 2

УДК 539.216.2

МАГНИТНЫЕ ФАЗОВЫЕ ПРЕВРАЩЕНИЯ В ЭПИТАКСИАЛЬНЫХ ФЕРРИТ-ГРАНАТОВЫХ ПЛЕНКАХ С ОРИЕНТАЦИЕЙ (210)

Е. Н. Ильичева, А. В. Клушина, Н. Н. Усманов, Н. Б. Широкова, А. Г. Шишков
(кафедра общей физики)

На основе изучения доменной структуры и процессов намагничивания эпитаксиальных пленок ферритов-гранатов с ориентацией (210) получены сведения о фазовых состояниях квазиодноосных магнитных пленок, ось легкого намагничивания которых отклонена от нормали на угол θ . К основным магнитным фазам пленки (210) относятся однодоменное состояние, ориентированная полосовая доменная структура и решетка наклоненных цилиндрических магнитных доменов гексагонального типа. В координатах магнитного поля (H_x , H_z) приведены диаграммы областей существования этих фаз и описаны условия взаимных переходов в процессе перемагничивания пленки (210).

Эпитаксиальные феррит-гранатые пленки с ориентацией (210), имеющие сильно выраженную ромбическую магнитную анизотропию, как показано в работе [1], можно условно считать квазиодноосными пленками, ось легкого намагничивания (ОЛН) которых отклонена от нормали на угол θ . В работе [1] было изучено перемагничивание этих пленок, показана связь компонент тензора магнитной восприимчивости с периодом полосовой доменной структуры (ПДС) и с углом θ . Установлено, что зарождение, смещение и коллапс доменов зависят от давления поля смещения H_z и плоскостного поля H_x на стенки наклоненных цилиндрических магнитных доменов (НЦМД).

В настоящей работе рассматриваются основные типы доменной структуры в пленках с ориентацией (210), определены области существования этих структур и найдены режимы различных фазовых превращений. Экспериментально изучены эпитаксиально осажденные пленки состава $(\text{BiLu})_3(\text{FeGa})_5\text{O}_{12}$ с ориентацией (210) толщиной 13 и 18,7 мкм, имеющие в размагниченном состоянии периоды ПДС $P_0 = 29,5$ и 26 мкм соответственно. Как показано в [1], пленки имеют спонтанную намагниченность $M_s = 5$ Гс, поле ромбической анизотропии $(H_k)_r = 1400$ Э и угол наклона ОЛН $\theta \approx 30^\circ$. Доменная структура пленок (210) выявляется с помощью магнитооптического эффекта Фарадея.

Полосовая доменная структура в пленках (210)

В отсутствие внешнего магнитного поля пленка (210) разбивается на регулярные полосовые домены одинаковой ширины, ориентированные вдоль проекции ОЛН на плоскость пленки (ось OX). Период ПДС P_0 определяется равновесием натяжения доменных границ с поверхностной плотностью энергии σ и давлением полей рассеяния от поверхностных магнитных зарядов с плотностью $\pm M_s \cos \theta$, так что здесь вполне применима теория [2], в которой характеристическая длина l должна содержать угол наклона ОЛН $l = \sigma (4\pi M_s^2 \cos^2 \theta)^{-1}$. Пленки типа (210), имеющие ориентированную ПДС, лучше согласуются с теорией [2], чем пленки (111), имеющие хаотическую лабиринтную доменную структуру, которую трудно рассчитать.

Далее будет показано, что в пленках (210) всякая перестройка доменной структуры, все процессы перемагничивания в полях, значительно меньших поля анизотропии (H_k), определяются давлением магнитного поля на 180° -е доменные стенки: $p = 2M_s H_x \sin \theta + 2M_s H_z \cos \theta$.

Размагниченное состояние может быть получено не только в отсутствие внешнего магнитного поля, но и при общем условии $p = 0$, когда выполняется соотношение

$$H_{0z} + H_{0x} \operatorname{tg} \theta = 0. \quad (1)$$

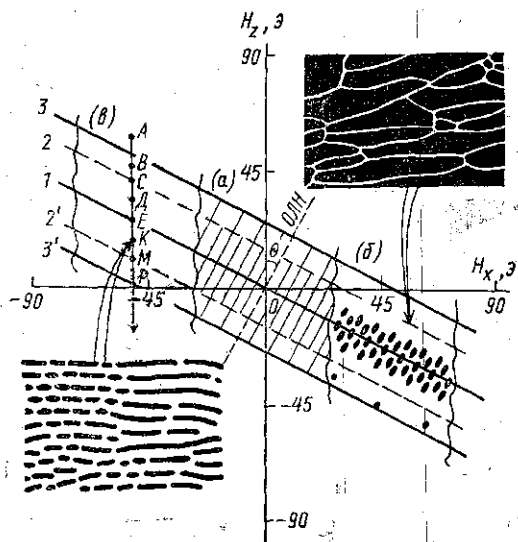


Рис. 1. Фазовая диаграмма (в координатах $H_x - H_z$) магнитного состояния пленки (210) с наклонной ОЛН: (а) — полосовая доменная структура, (б) — решетка наклоненных цилиндрических магнитных доменов и (в) — перемагничивание пленки (210) из точки А в точку Р. Критические кривые размагниченно-го состояния (1); состояний, при которых начинает увеличиваться период ПДС (2—2'), и насыщения пленки (210) (3—3'). На вставках — фотографии доменной структуры в различных состояниях

В этих полях вблизи прямой (1) на диаграмме рис. 1 (область а) в полосе шириной $\pm H_c \approx 2$ Э результирующая намагниченность пленки $\langle M_z \rangle \approx \langle M_x \rangle = 0$. Намагничивание под действием обеих компонент магнитного поля (H_x и H_z) происходит путем расширения выгодно поляризованных доменов за счет соседей [1]. Если относительная намагниченность пленки $m_z = \langle M_z \rangle / (M_s \cos \theta)$ не превышает значения 0,3—0,4, то намагничивание происходит при неизменном периоде ПДС ($P = P_0$) и постоянной восприимчивости χ . Соответствующая область полей ограничена двумя прямыми (2—2') на диаграмме рис. 1 (область а). В более сильных полях при $m_z \geq 0,4$ наступает прогрессирующее увеличение периода ПДС, вызывающее нелинейный рост намагниченности вплоть до технического насыщения пленки (210) при $\langle M_z \rangle_s = M_s \cos \theta$ ($m_{zs} = \pm 1$).

Локальный скачкообразный рост периода с полем происходит в местах расположения «магнитных дислокаций» соответствующего знака, когда диаметр головки домена в центре дислокации уменьшается до критического значения d_{\min} , при котором происходит необратимое выбегание головки. При подходе к насыщению наблюдается выбегание

свободных концов изолированных полосовых доменов или «коллапс» свободных концов, имеющих минимальный диаметр d_{\min} , примерно равный $P_0/4$. Критические кривые поля насыщения 3 и $3'$ на рис. 1 (область a) ограничивают область многодоменного состояния пленок (210). Прямые 3 и $3'$ располагаются параллельно прямой 1, описывающей размагниченное состояние, и они характеризуют предельное давление на доменные стенки в пленках с наклонной ОЛН.

Решетка наклонных ЦМД

В размагниченном состоянии пленка (210) также может иметь упорядоченную плотноупакованную решетку НЦМД гексагонального типа с периодом, соответствующим периоду ПДС. В отличие от пленок (111) здесь домены наклонены в плоскости (ZOX) на угол $\theta \approx 30^\circ$ так, что стенки НЦМД не имели магнитостатического заряда. В силу осевой симметрии решетка НЦМД (РНЦМД) имеет более низкую энергию полей рассеяния, чем в случае ПДС, однако энергия доменных стенок РНЦМД значительно выше из-за увеличенной площади поверхности стенок.

Расчеты энергии РНЦМД и расчеты структуры единичного домена в пленке с наклонной ОЛН в зависимости от напряженности магнитного поля H_z приведены в работе [3]. Каждый из доменов характеризуется двумя ортогональными размерами (поперечный d_1 и продольный d_2). Измеренное нами изменение размеров НЦМД под действием магнитного поля показано на рис. 2. Вытянутость доменов (d_2/d_1) с ростом давления магнитного поля уменьшается, что согласуется с расчетами [3].

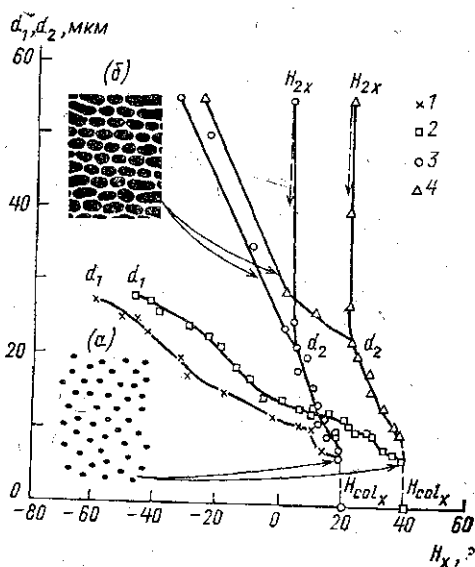


Рис. 2

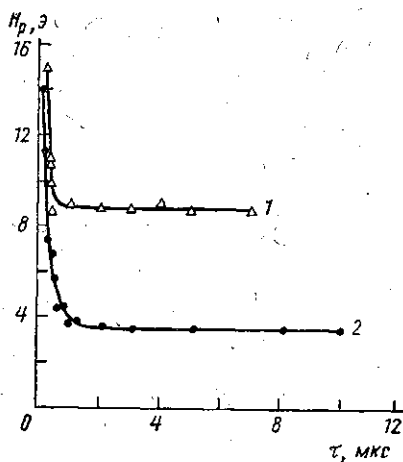


Рис. 3

Рис. 2. Изменение размеров НЦМД под действием приложенного магнитного поля H_x : 1 — d_1 и 3 — d_2 при $H_x = 14,3$ Э; 2 — d_1 и 4 — d_2 при $H_x = 4,4$ Э. Фотографии доменной структуры пленки (210): (а) — перед коллапсом НЦМД; (б) — «сотовая» структура в отрицательном магнитном поле. Левая ветвь кривых $d_2(H_x)$ соответствует плотноупакованной «сотовой» структуре

Рис. 3. Пороговые кривые импульсного зарождения РНЦМД: 1 — $H_z = 0, H_{x0} = 0$; 2 — $H_z = 22$ Э, $H_{x0} = 0$

Экспериментальные значения суммарного поля коллапса, при котором исчезает около 90% числа исходных НЦМД, ложатся вблизи кривых насыщения 3 или 3' (см. рис. 1). Следовательно, критическое поле коллапса НЦМД можно описать уравнением

$$H_{\text{col}_z} + \text{tg } \theta \cdot H_{\text{col}_x} = p_{\text{col}} / (2M_s \cos \theta), \quad (2)$$

где p_{col} — критическое давление на стенки НЦМД, при котором наступает необратимое исчезновение домена.

Диаметр домена при коллапсе $d_{1\text{col}} \approx d_{2\text{col}} = 6$ мкм составляет примерно четвертую часть периода P_0 , так же как и в пленках (111). При ослаблении давления приложенного магнитного поля наблюдаются анизотропное увеличение НЦМД и удлинение в продольном направлении. В поле эллиптической неустойчивости НЦМД H_2 длины доменов резко увеличиваются, если этому не препятствуют близко расположенные соседние домены (см. кривую d_2 на рис. 2). В отрицательном магнитном поле РНЦМД постепенно преобразуется в вытянутую «сотовую» структуру (см. вставку (б) на рис. 2). По мере приближения к насыщению «соты» вытягиваются в узкие «светлые» домены, которые разрываются и быстро исчезают в поле насыщения H_s . Кривые насыщения РНЦМД почти такие же, как и в случае подавления ПДС (см. рис. 1).

Переходы «однодоменное — многодоменное состояние» и процессы перемагничивания пленки (210)

В исходном однодоменном состоянии пленка находится в точке А на рис. 1 (область ν). Рассмотрим процессы перемагничивания при фиксированном поле H_x , опускаясь по вертикали $A \rightarrow P$, изменяя поле H_z и наблюдая изменение доменной структуры. Для выявления быстро изменяющейся структуры воспользуемся небольшими короткими импульсами H_{pz} обратной полярности по отношению к исходной («темной») намагниченности пленки. В точке В, лежащей между кривыми 3 и 2, после наложения импульсов $H_p \approx 2$ Э возникают единичные «светлые» НЦМД, число которых возрастает по мере приближения к кривой 2. Эффективность импульсного зарождения доменов зависит от длительности и частоты прикладываемых импульсов (см. пороговые кривые на рис. 3). Так, например, в постоянном подмагничивающем поле $H_x = 0$, $H_z = 22$ Э импульсами $H_{pz} = 4$ Э длительностью $\tau = 1,5$ мкс можно создать плотную упорядоченную решетку НЦМД.

Динамику возникновения доменов с обратной намагниченностью мы регистрировали с помощью лазерной высокоскоростной фотографии; снимки делались в момент действия импульсного магнитного поля через время t от начала импульса и после окончания импульса (рис. 4). За время действия импульса $H_p = 5,6$ Э с длительностью $\tau = 2,5$ мкс «светлые» зародыши в центре пленки сильно вытягивались вдоль оси ОХ, а затем после окончания импульса сжимались до минимального устойчивого размера $d \approx 6$ мкм.

В точке С на кривой 2 (рис. 1) в поле зрения микроскопа появляются вытянутые полосовые домены, проросшие с краев образца. Эта точка соответствует статическому полю зародышеобразования на краях пленки. При воздействии импульсного магнитного поля можно получить «светлые» НЦМД и вытянутые полосовые домены одновременно. В точке D, расположенной между кривыми 2 и 1, в зависимости от способа формирования доменной структуры получаем «картинку» в виде полосовых доменов, НЦМД и вытянутых НЦМД и их различных

сочетаний. Импульсы большой амплитуды (10—16 Э), когда суммарное поле опускается ниже кривой 1, создают «темные» НЦМД на «светлом» фоне.

Пороговая кривая для импульсного зарождения новых доменов в исходном размагниченном состоянии (точка E на рис. 1 (в)) приведена на рис. 3 (кривая 1). Наложение серии импульсов небольшой амплитуды $H_p \approx 8,8$ Э с частотой 4 кГц вызывает постепенное образование решетки «темных» НЦМД, показанных на рис. 1 (б). Процесс растягивания ЦМД, искривления и разрыва полосовых доменов, накопле-

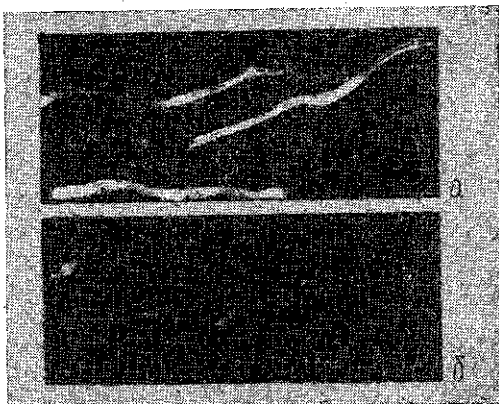


Рис. 4. Фотографии доменной структуры: а — $t=2$ мкс, $\tau=2,5$ мкс, $H_0=22$ Э, $H_p=5,6$ Э; б — после окончания импульса поля

ния НЦМД и установления плотной гексагональной решетки по мере увеличения числа приложенных ненасыщающих импульсов имеет место в широкой области полей смещения между кривыми 2 и 2' (см. рис. 1). Однократное импульсное «разрезание» полосовых доменов и образование РНЦМД в сильном, почти насыщающем импульсном магнитном поле описано в работе [4].

В точке M на кривой 2' начинается необратимое увеличение периода магнитной структуры, и далее при выходе в точку P на кривой 3' наступает насыщение пленки (210) либо вследствие коллапса НЦМД, либо вследствие конечного коллапса вытянутых редких доменов.

Выводы

1. Пленки (210) в размагниченном состоянии имеют регулярную, ориентированную *полосовую доменную структуру*, в отличие от хаотической лабиринтной микрополосовой структуры пленок типа (111). При намагничивании ПДС сохраняются неизменными период и магнитная восприимчивость, пока не начнется подавление магнитных дислокаций.

2. С помощью магнитного поля в пленках (210) формируется гексагональная *решетка из наклоненных ЦМД*. Направление намагниченности в доменах, их вытянутость, преобразование в «сотовую» или полосовую структуру зависят от магнитной предыстории, от режима магнитного воздействия.

3. При определенных условиях может быть создана *смешанная доменная структура (РНЦМД—ПДС)*, состоящая из системы НЦМД, гантелевидных доменов и вытянутых полосовых доменов с единым согласованным периодом. Такое сосуществование ЦМД-структуры и ПДС важно для построения различных устройств по хранению и обработке информации [5].

4. При осуществлении взаимных структурных переходов (ПДС—РНЦМД) решающую роль играют неоднородности (магнитные дислокации) и свободные концы (вершины) вытянутых доменов, направление и характер движения которых зависят от полярности приложенного магнитного поля.

5. Следует выделить два критических поля, при которых происходит необратимая перестройка доменной структуры:

а) *поле коллапса* H_{col} , когда преобладает лапласовское натяжение искривленной доменной стенки; в поле коллапса исчезают ЦМД и убегают изолированные полосовые домены, наступает техническое насыщение пленки (210);

б) *поле эллиптической неустойчивости* НЦМД, поле H_2 : на свободном конце (вершине) домена преобладает локальное размагничивающее поле и наступает необратимое резкое удлинение домена.

Авторы благодарны А. М. Балбашову (МЭИ) за предоставление образцов пленок с ориентацией (210).

ЛИТЕРАТУРА

[1] Ильичева Е. Н., Шишков А. Г., Клушина А. В. и др. // ЖТФ. 1993. 63, № 11. С. 143. [2] Кооу С., Епс У. // Philips Res. Reports. 1960. 15, N 1. P. 7. [3] Иванов Ю. В., Кандаурова Г. С. // Микроэлектроника. 1977. 6, № 3. С. 242. [4] Иванов Л. П., Логгинов А. С. и др. // Микроэлектроника. 1977. 6, № 2. С. 199. [5] Рандошкин В. В., Червоненкис А. Я. Прикладная магнитооптика. М., 1990.

Поступила в редакцию
16.07.93

ВЕСТН. МОСК. УН-ТА. СЕР. 3, ФИЗИКА. АСТРОНОМИЯ. 1994. Т. 35, № 2

УДК 669.788:669.017.3

ИЗМЕНЕНИЕ ДИФРАКЦИОННОЙ КАРТИНЫ ДЕФОРМИРОВАННЫХ И ОТОЖЖЕННЫХ СПЛАВОВ Pd—W (7 ат.% W) ПРИ НАВОДОРОЖИВАНИИ И ПОСЛЕДУЮЩЕЙ РЕЛАКСАЦИИ

А. А. Кацнельсон, И. В. Сухорукова, Г. П. Ревкевич

(кафедра физики твердого тела)

Изучено изменение дифракционной картины для сплавов Pd—W (7 ат.% W) после наводороживания, проводимого вслед за различной предварительной обработкой. Показано, что при наводороживании и последующей релаксации на воздухе при комнатной температуре в сплаве происходят структурные изменения, носящие осцилляционный характер: сначала, как правило, дифракционные максимумы расширяются, затем сужаются и вновь расширяются. Указано, что подобный характер структурных изменений может быть связан с особенностями взаимодействия водорода с дефектами в металлах. Этот процесс целесообразно рассматривать на основе синергетического подхода.

Особый характер взаимодействия водорода с палладием хорошо изучен, и именно поэтому палладий и его сплавы, способные поглощать большие количества водорода, являются удобным объектом для изучения различных аспектов проблемы «металл—водород». Ранее [1—3] было показано, что водород влияет на дефектную структуру палладия и тех твердых растворов на его основе, которые испытывают α — β фазовое превращение. Однако при сосуществовании двух твердых растворов внедрения водорода с существенно разными параметрами решетки изучить собственно влияние атомов водорода на дефектную структуру не представляется возможным.

Объектами для настоящего исследования могут служить материалы, которые, с одной стороны, поглощают водород в количестве, достаточном для возникновения в материалах структурных изменений, а с другой — не образуют β -фазу. К таким, в частности, относятся сплавы Pd—W при заметном количестве W. Целью данной работы было установление характера влияния водорода на дефектную структуру на примере сплава Pd—W (7 ат.% W).