

# Экспериментальное исследование магнитной структуры доменных границ в тонких ферромагнитных пленках

© В.П. Панаэтов

Кабардино-Балкарский государственный университет,  
Нальчик, Россия

E-mail: Valen\_pvs@rambler.ru

(Поступила в Редакцию 8 августа 2008 г.  
В окончательной редакции 26 января 2009 г.)

С помощью электронной микроскопии методом Лоренца исследована структура доменных границ в тонких магнитных пленках. Экспериментально доказана возможность существования одинакового и противоположного направлений вращения вектора намагниченности в границах Нееля. В монокристаллических магнитных пленках обнаружены доменные границы, разделяющие  $90^\circ$  домены. Эти границы состоят из доменов, значительно меньших по площади, чем  $90^\circ$  домены.

PACS: 75.30.Gw, 75.70.Ak, 75.70.Kw

## 1. Введение

Известно [1,2], что в тонких магнитных пленках имеются однородные границы — границы Блоха, границы Нееля и периодические доменные границы. Изучению структуры магнитных доменных границ (ДГ) посвящено много работ, но экспериментальных исследований, доказывающих определенную модель вращения векторов намагниченности в доменных границах и детально анализирующих поведение ДГ в магнитном поле, мало. Многие из приведенных ранее экспериментальных доказательств являются косвенными. Это объясняется тем, что только при большом увеличении можно разрешить детали магнитной структуры, позволяющие определить направление вектора намагниченности в границе.

При сближении ДГ внешним магнитным полем, приложенным вдоль оси легкого намагничивания (ОЛН), может наблюдаться притяжение и отталкивание границ. Процессы взаимодействия и перемагничивания ДГ определяются структурой границ. В настоящей работе приводятся экспериментальные исследования магнитной структуры ДГ в тонких ферромагнитных пленках.

## 2. Методика эксперимента

Известно, что в пленках Fe–Ni толщиной менее 30 нм с одноосной анизотропией в плоскости энергетически выгоднее границы Нееля [3]. В частности, теоретически было показано, что в тонких пленках никеля, кобальта и сплава Ni–Fe с малым значением константы перпендикулярной анизотропии направление вращения вектора намагниченности в двух рядом расположенных границах может быть как одинаковым, так и противоположным. Для исследования вращения вектора намагниченности в границах Нееля наиболее удобными в экспериментальном отношении оказались пленки из сплава  $\text{Fe}_{0.2}\text{—Ni}_{0.8}$  толщиной  $t \sim 30$  нм с константой одноосной анизотропии в плоскости, равной  $2 \cdot 10^2 \text{ J/m}^3$ . Этот сплав удобен тем, что позволяет уменьшить влияние

напряжений, возникающих в пленке, при размещении его на электронно-микроскопической сетке, так как он обладает малым значением константы магнитострикции. Пленки конденсировались в присутствии постоянного магнитного поля напряженностью  $\sim 8000 \text{ A/m}$ , которое создавалось электромагнитом, расположенным внутри вакуумной камеры. Направление магнитного поля совпадало с плоскостью образцов. После обезгаживания тигля и подложек устанавливалась необходимая температура последних и проводилось испарение материала.

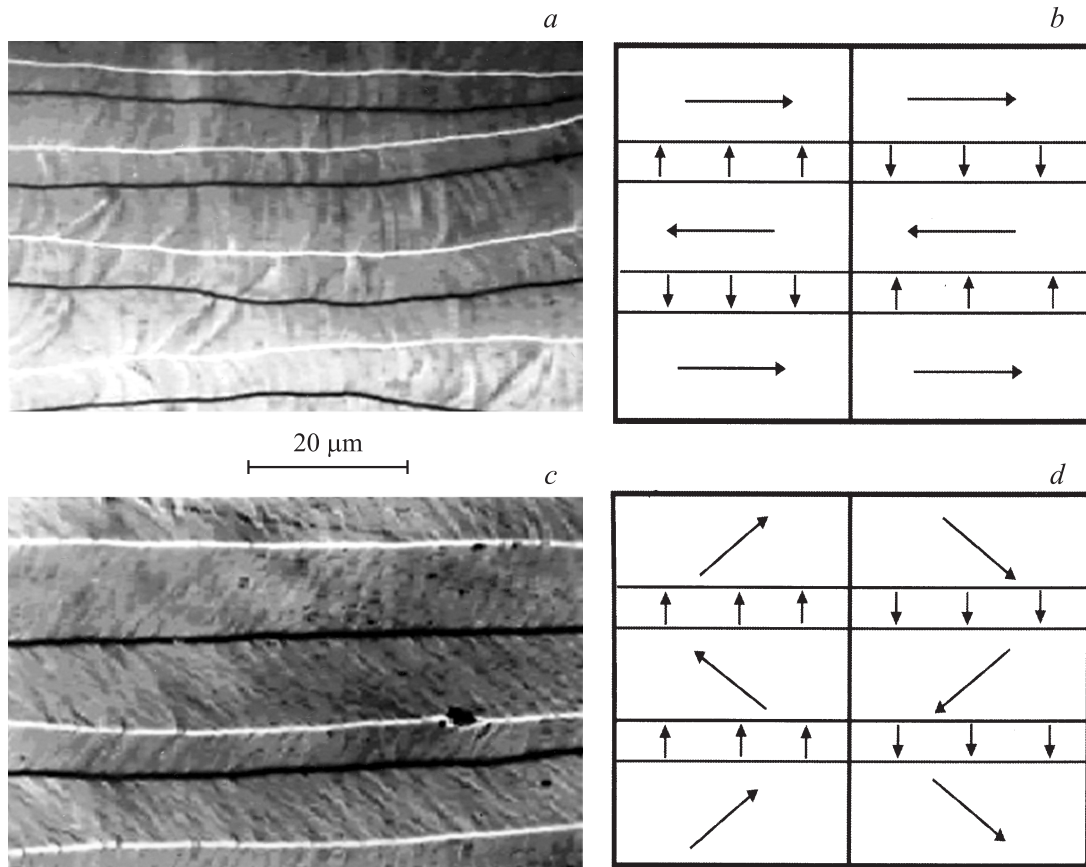
Для изучения периодических ДГ исследовались образцы толщиной  $t \sim 50 \text{ nm}$ , полученные методом термического испарения сплава  $\text{Fe}_{0.25}\text{—Ni}_{0.75}$  ( $\lambda_s > 0$ ) в вакууме на свежие сколы монокристаллов NaCl в постоянном магнитном поле [4,5].

Монокристаллические пленки получены при распылении в вакууме  $\approx 10^{-5} \text{ Pa}$  сплава  $\text{Fe}_{0.22}\text{—Ni}_{0.53}\text{—Co}_{0.25}$  на подложки из монокристаллов NaCl или LiF. Температура эпитаксиального роста составляла 463 К. Подробно методика выращивания мозаичных монокристаллических пленок ферромагнитных металлов и их сплавов изложена в [6].

Изображение магнитных структур было получено в просвечивающем электронном микроскопе методом Лоренца. Темный контраст ДГ на фотографии образуется тогда, когда электронные потоки от соседних доменов сходятся вместе над ДГ. Светлый контраст ДГ возникает на фотографии в случае, когда электронные потоки расходятся над ДГ.

## 3. Границы Нееля

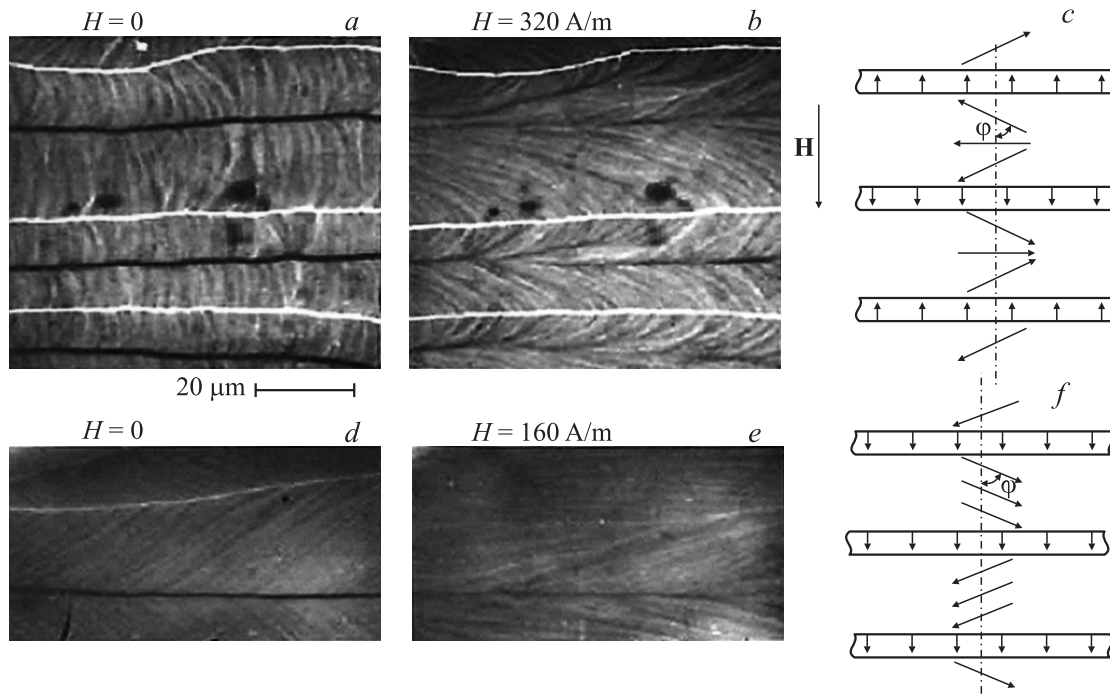
Определение направления вращения вектора намагниченности в соседних границах основано на анализе тонкой магнитной структуры доменов — дисперсии магнитной анизотропии, или „ряби намагниченности“ [7]. По тонкой структуре находится направление вектора намагниченности  $\mathbf{J}_s$  вблизи границы, а также направление вектора намагниченности в центре границы Нееля.



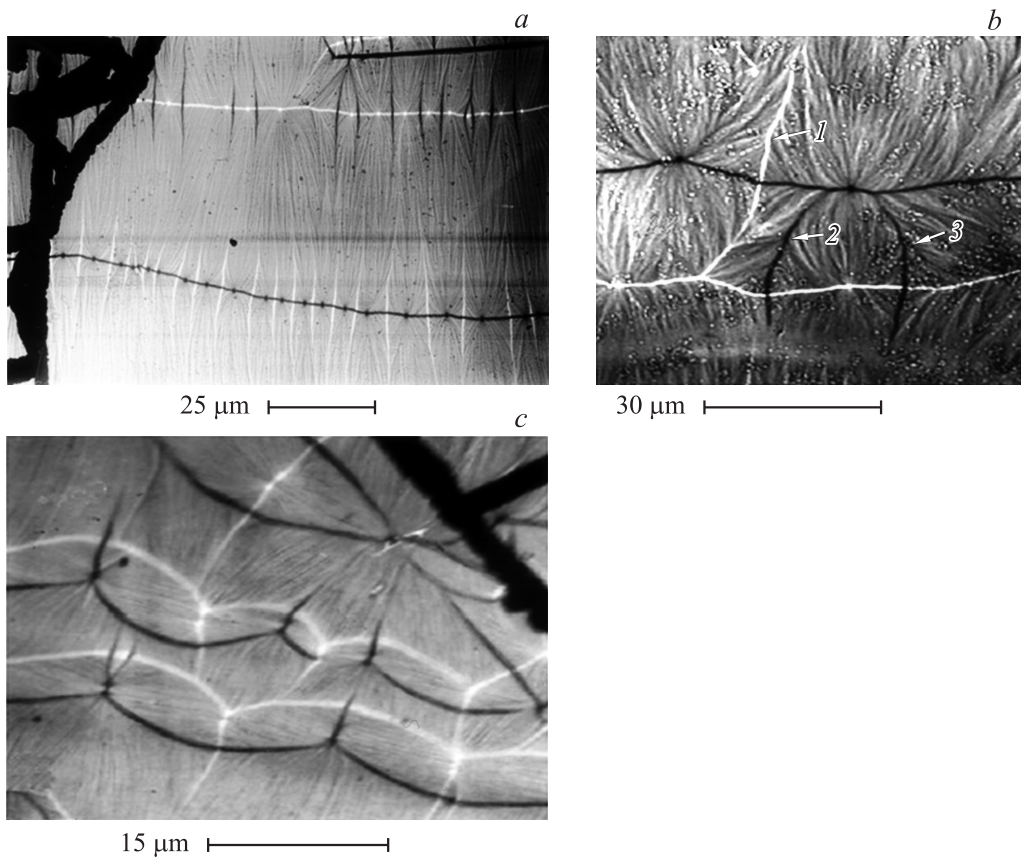
**Рис. 1.** Доменная структура границ Нееля. *a, b* — магнитная структура и схема с одинаковым направлением вращения векторов намагниченности в границах; *c, d* — магнитная структура и схема с противоположным направлением вращения векторов намагниченности в границах.

На рис. 1 показаны доменные магнитные структуры двух типов: с одинаковым (*a*) и противоположным (*c*) направлениями вращения вектора намагниченности. Из рис. 1, *a* следует, что вектор намагниченности изменяет свое направление на  $180^\circ$  при переходе из одного домена в соседний домен. Направление  $\mathbf{J}_s$  в средней части доменов на рис. 1, *b* показано большими стрелками, а направление  $\mathbf{J}_s$  в центре доменных границ — маленькими стрелками. Нами был измерен угол  $\alpha$  между вектором намагниченности  $\mathbf{J}_s$  и ОЛН. В таких структурах намагниченность в домене при приближении к границе постепенно изменяет свое направление на угол  $\alpha$ , составляющий не более  $10^\circ$ , вследствие чего „рябь“ на снимке приобретает характерный дугообразный вид. Затем происходит быстрое изменение направления  $\mathbf{J}_s$  в самой границе. Ширина области постепенного поворота вектора намагниченности  $\mathbf{J}_s$  зависит от расстояния между границами. На рис. 1, *c* показана магнитная структура с границами, имеющими противоположное направление вращения намагниченности. В этом случае они не  $180^\circ$ , а „рябь намагниченности“ имеет вид наклонных прямых. Поведение структур, показанных на рис. 1, *a, c*, во внешних полях существенно различается. Особенно наглядно различие между этими структурами проявляется

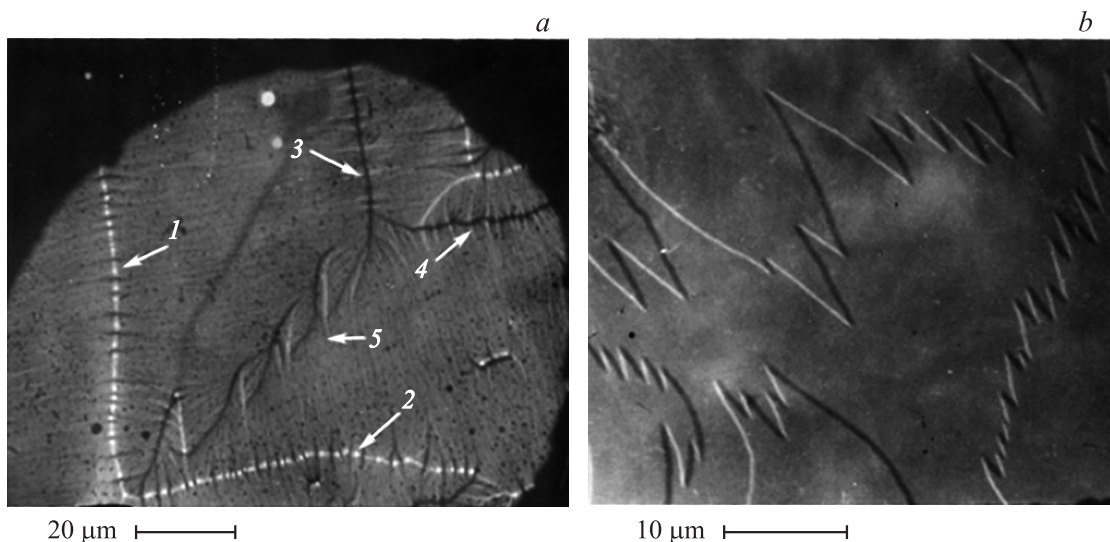
при действии на пленку поля  $H_\perp$  вдоль оси трудного намагничивания (ОТН) (рис. 2). Границы, у которых намагниченность в центре совпадает с направлением поля  $H_\perp$ , при определенной величине этого поля исчезают, а границы, у которых намагниченность в центре ориентирована против внешнего поля, остаются в пленке. В результате, если приложить поле  $H_\perp$  к пленке, в которой имеется несколько пар доменных границ с одинаковым направлением вращения намагниченности в границах, то при определенном значении величины  $H_\perp$  границы исчезают через одну (рис. 2, *b*). При действии поля  $H_\perp$  на пленку с границами, имеющими противоположное направление вращения  $\mathbf{J}_s$ , границы исчезают одновременно (рис. 2, *e*). На рис. 2, *c, f* приведены схемы распределения намагниченности в доменах с одинаковым (*c*) и противоположным (*f*) направлениями вращения  $\mathbf{J}_s$  в ДГ. В первом случае (рис. 2, *c*) намагниченность в доменах имеет веерообразное распределение. Угол  $\varphi$  принимает значение от  $\varphi = 90^\circ - \Delta$  до  $\varphi = 90^\circ + \Delta$ , где  $\Delta$  — угол между направлением ОЛН и вектором намагниченности в непосредственной близости от границы,  $\varphi$  — угол между направлением ОТН и вектором  $\mathbf{J}_s$ . Во втором случае (рис. 2, *f*) вектор  $\mathbf{J}_s$  расположен по отношению к ОТН под углом  $\varphi = 90^\circ - \Delta$  по всей площади домена.



**Рис. 2.** Перемагничивание доменных границ во внешнем магнитном поле, приложенном вдоль оси трудного намагничивания. *a, d* — магнитные структуры с одинаковым и противоположным направлениями вращения вектора  $\mathbf{J}_s$  в границах; *b* и *e* — вид магнитных структур после стирания полем границ; *c, f* — схемы распределения  $\mathbf{J}_s$  в доменах с одинаковым (*a*) и противоположным (*d*) направлениями вращения  $\mathbf{J}_s$  в доменных границах.



**Рис. 3.** Периодические доменные границы: *a* — не взаимодействующие, *b* — взаимодействующие. *c* — минимальное расстояние между ДГ, когда границы изгибаются дугообразно и затем аннигилируют.



**Рис. 4.** Магнитная структура монокристаллических пленок состава  $\text{Fe}_{0.22}\text{-Ni}_{0.53}\text{-Co}_{0.25}$ . *a* — цифрой 5 обозначена доменная граница, состоящая из доменов, толщина пленки 70 nm (остальные обозначения см. в тексте); *b* — зигзагообразные доменные границы в пленке толщиной 100 nm.

Во внешнем поле, приложенном вдоль ОН, перемагничивание границ с противоположным направлением вращения  $\mathbf{J}_s$  происходит в два этапа: сначала происходит исчезновение тех границ, у которых имеется компонента распределения векторов намагниченности, направленная вдоль поля (рис. 2, *b*), а затем при некотором значении  $H_{\perp}$  скачком стираются оставшиеся границы.

Таким образом, структура ДГ, показанная на рис. 1, *a*, в отличие от структуры ДГ на рис. 1, *c* обладает большей устойчивостью к воздействию внешних полей.

#### 4. Взаимодействие периодических доменных границ

В размагниченном состоянии периодические границы приведены на рис. 3, *a*. Магнитная структура находится в равновесном состоянии, а ДГ не взаимодействуют между собой. Это проявляется в том, что поперечные связи на ДГ плавно переходят в „рябь намагниченности“, нет искривлений поперечных связей и изгибов ДГ. Средние расстояния между поперечными связями, имеющими одинаковую длину, одинаковы, и круговые линии Блоха находятся между ними примерно в центре. С уменьшением расстояния между границами происходит замыкание поперечных связей на круговые линии Блоха. Из наблюдений взаимодействия ДГ с поперечными связями следует, что границы с поперечными связями начинают взаимодействовать между собой на больших расстояниях, чем для однородных границ. Расстояние, на котором следует учитывать взаимное влияние, примерно равно длине поперечной связи. При уменьшении расстояния между периодическими границами с момента замыкания поперечных связей на круговые наблюдается увеличение

поля смещения ДГ и поля старта круговых линий Блоха [8].

Периодические границы, приведенные на рис. 3, *b*, взаимодействуют между собой. Поперечные связи соседних границ замкнулись на соседние круговые линии Блоха. Из рис. 3, *b* видно, что на круговую линию Блоха замыкается одна поперечная связь (обозначена на снимке цифрой 1), а на другую замыкаются две поперечные связи (обозначены цифрами 2, 3). Доменные границы искривились. Искривление ДГ хорошо видно из рис. 3, *c*. Участки границ приобрели дугообразный вид, причем ДГ сдвинуты максимально близко, настолько, что дальнейшее увеличение магнитного поля приведет к уничтожению этой структуры. Поля рассеяния от отдельных участков ДГ складываются и создают такую конфигурацию доменных структур. Две пары периодических ДГ сдвинулись настолько, что отдельные участки границ испытывают отталкивание, а другие участки ДГ — притяжение, что и привело к характерному дугообразному „волновому“ виду доменной структуры.

#### 5. Структура доменных границ в монокристаллических пленках

Новый тип границ обнаружен в монокристаллических пленках, полученных при эпитаксиальном росте на подложках из монокристаллов NaCl или LiF. На рис. 4 приведены фотографии магнитной структуры таких пленок.

Магнитная структура монокристаллических пленок значительно отличается от магнитной структуры поликристаллических пленок. Это различие заключается в том, что в случае монокристаллических пленок нет ярко выраженной дисперсии магнитной анизотропии; в частности, на рис. 4, *b* дисперсия совсем отсутствует.

Наблюдается упорядочение магнитной структуры, которое можно объяснить упорядочением кристаллической структуры. Видно, что имеются две ОЛН (рис. 4, *a*). В поле зрения находятся светлые периодические ДГ (левый нижний угол фотографии), обозначенные цифрами 1 и 2, расположенные вдоль указанных ОЛН. Эти оси взаимно перпендикулярны. В правом углу фотографии находятся темные периодические ДГ (обозначенные цифрами 3 и 4), параллельные светлым границам. После темных ДГ наблюдается угол из светлых периодических ДГ. По диагонали виден участок границы (отмеченный цифрой 5), отделяющий вертикальный домен от горизонтального домена. Диагональный участок ДГ, состоящий из доменов, показан на рис. 4, *a*. Именно этот участок границы представляет собой новый тип границы — набор доменов с разными вершущками. „Рябь намагниченности“ просматривается слабо. Самый первый домен, образующий диагональную границу (в левом углу рис. 4, *a*), достаточно хорошо виден, и заметна круговая блоховская линия. У этого домена одна вершущка несимметричная закрытого типа, а другая — несимметричная открытого типа [9].

В более толстых пленках наблюдались зигзагообразные границы. На рис. 4, *b* приведены зигзагообразные границы, которые были получены нами в пленках толщиной 100 нм. После анализа магнитной структуры, приведенной на рис. 4, *a*, становится очевидным, что зигзагообразная граница тоже представляет собой набор доменов, располагающихся вдоль ОЛН. Из магнитной структуры (рис. 4, *a, b*) видно, что границы, состоящие из набора доменов, могут разделять как  $90^\circ$ , так и  $180^\circ$  домены.

## 6. Заключение

Таким образом, экспериментально доказано, что в тонких ферромагнитных пленках могут существовать доменные границы с одинаковым и противоположным направлениями вращения намагниченности в них.

Периодические доменные границы состоят из участков, разделенных линиями Блоха. При сближении ДГ в тех местах, где взаимодействуют границы с одинаковым направлением вращения вектора намагниченности, наблюдается отталкивание ДГ, а в местах, где взаимодействуют границы с противоположным направлением вращения вектора намагниченности, наблюдается притяжение ДГ. Вследствие такого взаимодействия возникает волнообразный вид магнитной структуры.

В монокристаллических пленках обнаружены доменные границы, которые получили название „зигзагообразных“. В электронном микроскопе наблюдались зигзагообразные границы, состоящие из доменов, площадь которых оказалась значительно меньше площади доменов, разделяемых исходной границей.

Автор выражает благодарность Г.В. Дедкову за поддержку и обсуждение работы.

## Список литературы

- [1] А. Хуберт. Теория доменных стенок в упорядоченных средах. Мир, М. (1977). 306 с.
- [2] A. Hubert, R. Schäfer. *Magnetic domains*. Springer, Berlin (1998). 696 p.
- [3] L. Neel. *Acad. Sci.* **241**, 6, 533 (1955).
- [4] V.P. Panaetov, V.P. Karabanova, V.I. Popov. *ICMFS-9. Booklet*. Poznan, Poland (1979). P. 254.
- [5] В.Г. Казаков, В.П. Панаэтов, Б.Ф. Бочкарев. *ФММ* **53**, 2, 407 (1982).
- [6] В.Г. Пынько, Р.В. Суханова. *Изв. АН СССР. Сер. физ.* **1**, 53 (1966).
- [7] В.И. Петров, Г.В. Спивак, О.П. Павлюченко. *УФН* **106**, 2, 229 (1972).
- [8] В.П. Карабанова, В.Н. Попов, Л.А. Гаверова, В.П. Панаэтов. В сб.: *Физика магнитных пленок*. Изд-во ИПИ, Иркутск (1980). С. 97.
- [9] В.П. Панаэтов. *Материалы симп. „Нанофизика и нанoeлектроника“*. Н.Новгород (2006). С. 235.