

05;06;07

©1994 г.

## ДИНАМИКА ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ МАГНИТНЫХ ДОМЕНОВ В ФЕРРИТ-ГРАНАТОВОЙ ПЛЕНКЕ КАК ПРОСТРАНСТВЕННОМ МОДУЛЯТОРЕ СВЕТА

*Е.И.Николаев, А.И.Линник, В.Н.Саятин*

В эпитаксиальных феррит-гранатовых пленках состава  $(\text{BiLu})_3(\text{FeGa})_5\text{O}_{12}$ , выращенных из раствора в расплаве  $\text{Bi}_2\text{O}_3-\text{V}_2\text{O}_5-\text{BaF}_2-\text{BaO}$ , исследован комплекс статических и динамических свойств ЦМД (скорость и подвижность доменных стенок в планарном магнитном поле  $H_p \leq 450 \text{ Э}$ , намагниченность насыщения, константа одноосной анизотропии, ширина линии ФМР). Показано, что при использовании ЦМД для формирования двумерного оптического изображения в качестве пространственного модулятора света (ПМС) может быть обеспечено время переключения единичного магнитооптического элемента  $\tau \leq 10^{-8}$  с при минимальной амплитуде переключающего токового импульса. Дальнейшее улучшение динамических характеристик ПМС на ЦМД связано с более полным исключением примесей быстрорелаксирующих редкоземельных ионов и  $\text{Fe}^{2+}$  из структуры феррограната, присутствие которых проявляется в уширении линии ФМР при диамагнитном разбавлении подрешеток железа. Показана реальная возможность получения ФГП с нулевой магнитострикцией  $\lambda_{111}$  и нулевой "чувствительностью" ЦМД к локальным напряжениям на пути их продвижения, что открывает перспективу управления ЦМД при существенно малой плотности тока в проводниковой управляющей схеме.

Достижения фотонной технологии применительно к разработкам оптического ассоциативного ЗУ в долгосрочном плане могут оказать существенное влияние на такие области, как робототехника, машинное зрение, искусственный интеллект. Требуемая высокая пропускная способность такого АЗУ может быть достигнута за счет метода аналоговой оптической обработки, в котором используется принцип выделения оптических фурье-характеристик двумерного объекта. Информация, содержащаяся в двумерном оптическом изображении, кодирует взаимодействующий с ним лазерный пучок, который после этого спонтанно осуществляет двумерное фурье-преобразование, реализуемое в фурье-плоскости.

Техническое решение, предлагаемое авторами, состоит в том, чтобы использовать для формирования двумерного оптического изображения цилиндрические магнитные домены, содержащиеся в В-замещенных феррит-гранатовых пленках (ФГП), обладающих высокой магнитооптической добротностью. Время перепрограммирования та-

кого пространственного модулятора света (определяющее пропускную способность системы) определяется скоростью перемещения ЦМД на расстояние, примерно равное диаметру, под действием импульса тока в электрической схеме. Такое решение представляет интерес в том случае, если длительность переключения единичного магнитооптического элемента (оптического затвора) менее 10 нс, из чего следует, что средняя скорость трансляции ЦМД диаметром 5 мкм должна быть не менее 500 м/с. В [1] показана возможность движения доменной стенки (ДС) со скоростью  $V_{DW}$  до 1450 м/с в ФГП  $(\text{BiTm})_3(\text{FeGa})_5\text{O}_{12}$  с большим эффективным гиромагнитным отношением  $\gamma$ . Однако такие ФГП помимо низкой термостабильности характеризуются низкой подвижностью ( $\mu_{DW} \leq 10 \text{ мс}^{-1} \cdot \text{Э}^{-1}$ ). Поэтому высокая скорость ЦМД в них может поддерживаться только при большой плотности тока в проводниках в управляющей схеме (и соответственно большом тепловыделении). Последнее обстоятельство обуславливает требование высокой подвижности  $\mu_{CMD} = 0.5\mu_{DW}$  в ФГП для оптического АЗУ.

Наибольшая подвижность ДС достигается в ФГП, содержащих только сферические или немагнитные ионы [2]. К таковым относится композиция  $(\text{BiLu})_3(\text{FeGa})_5\text{O}_{12}$ , которая позволяет иметь наибольшее Vi-замещение по условию соответствия кристаллических решеток ФГП и подложечного кристалла ГГГ. Линейная область динамики ЦМД по продвигающему полю в таких "высокоподвижных" ФГП очень мала, но она может быть расширена путем приложения магнитного поля  $H_p$  в плоскости ФГП, что позволяет одновременно увеличивать  $V_{DW}$  и  $\mu_{DW}$  [2,3]. Так, приложение  $H_p = 100 \text{ Э}$  позволило наблюдать в ФГП  $(\text{BiYLu})_3(\text{FeGa})_5\text{O}_{12}$  трансляционное движение ЦМД  $\phi$  3 мкм со скоростью  $600 \text{ м} \cdot \text{с}^{-1}$  и подвижностью  $335 \text{ м} \cdot \text{с}^{-1} \cdot \text{Э}^{-1}$  [4]. Этот результат является самым впечатляющим из всех опубликованных данных по трансляционной динамике ЦМД. Следует, однако, отметить, что применение столь большого поля  $H_p$  в реальных устройствах достаточно проблематично.

В настоящей работе исследована возможность достижения максимального уровня динамических свойств пятимикронных ЦМД в ФГП  $(\text{BiLu})_3(\text{FeGa})_5\text{O}_{12}$  толщиной  $h = 5 \text{ мкм}$  в поле  $H_p \leq 500 \text{ Э}$ , что определялось целевым назначением магнитооптической среды.

Для жидкофазной эпитаксии ФГП на подложках ГГГ ориентации (111) был применен оригинальный растворитель  $\text{Vi}_2\text{O}_3\text{-V}_2\text{O}_5\text{-BaF}_2\text{-BaO}$ , характеризующийся относительно низкой коррозионной активностью по отношению к платине и отсутствием в его составе PbO, что позволило уменьшить оптическое поглощение, связанное с вхождением в структуру граната ионов  $\text{Pb}^{2+}$ ,  $\text{Pb}^{4+}$ ,  $\text{Pt}^{4+}$ ,  $\text{Fe}^{2+}$  [3]. Последний к тому же ответствен за увеличение параметра вязкого затухания  $\alpha$  и соответственно снижение линейной подвижности ДС. В полученных образцах исследованы  $\mu_{CMD}$ ,  $V_{CMD}$ , ширина линии ферромагнитного резонанса  $\Delta H_{FMR}$ , а также намагнитченность насыщения  $4\pi M_S$ , константа одноосной анизотропии  $K_u$  и др., для чего применялись стандартные измерительные методики [5].

Характеристики типичного образца представлены в табл. 1.

Значения, помеченные звездочкой, получены при измерении в поле  $H_p = 450 \text{ Э}$ , при этом эффективный параметр затухания определен

Таблица 1.

Состав ФГП	$h$ , мкм	$4\pi M_S$ , Гс	$K_u$ , $10^3$ эрг/см <sup>3</sup>	$\gamma$ , $10^7 \text{Э}^{-1} \cdot \text{с}^{-1}$	$A$ , $10^{-7}$ эрг/см
$\text{Bi}_1\text{Lu}_2\text{Fe}_{3.8}\text{Ga}_{1.2}\text{O}_{12}$	5.0	160	6.9	1.76	1.6

Продолжение

Состав ФГП	$V_{CMD}^{\max}$ , м/с	$\mu_{DC}$ , м/(сЭ)	$\alpha_{ef}$	$\alpha_{FMR}$
$\text{Bi}_1\text{Lu}_2\text{Fe}_{3.8}\text{Ga}_{1.2}\text{O}_{12}$	> 400*	260*	0.0031*	0.0024

как [2]

$$\alpha_{ef} = \mu_{DW}^{-1} \cdot \gamma \cdot \Delta_0, \quad (1)$$

где  $\Delta_0 = \sqrt{A/K_u}$  — параметр ширины ДС,  $A$  — константа обменного взаимодействия.

Максимальное значение скорости  $V_{CMD}^{\max}$  определено ограничениями измерительной аппаратуры, в то время как в соответствии с формулой [2]

$$V^{\max}(H_p \gg 8M) = 0.5\pi \cdot \gamma \cdot \Delta_0 \cdot H_p \quad (2)$$

ожидаемое значение критической скорости  $V^{\max}$  составляет  $570 \text{ м} \cdot \text{с}^{-1}$ , что соответствует минимальным техническим требованиям. Подвижность  $\mu_{DW} = 2\mu_{CMD} = 260 \text{ м} \cdot \text{с}^{-1} \cdot \text{Э}^{-1}$ , по-видимому, является самой высокой для данной композиционной системы, поскольку наивысшее достижение по прежним публикациям составило  $200 \text{ м} \cdot \text{с}^{-1} \cdot \text{Э}^{-1}$  в поле  $H_p = 300 \text{ Э}$  [3]. Вместе с тем эта величина ниже теоретической  $\mu_{DW}^{FMR}$ , которая определяется из (1) подстановкой величины  $\alpha_{FMR} = 0.0024$  и равняется  $330 \text{ м} \cdot \text{с}^{-1} \cdot \text{Э}^{-1}$ .

Возможные пути повышения  $\mu_{DW}$  анализируются ниже. На рис. 1 представлена зависимость скорости  $V_{CMD}$  в ФГП (табл. 1) от продвигающего поля  $d \cdot \nabla H$  ( $d$  — диаметр ЦМД,  $\nabla H$  — градиент поля смещения), измеренной по методу Велла-Колейро [6] с приложением поля в плоскости  $H_p$ . Величина  $\mu_{CMD}$  определяется для каждой прямой как  $\Delta V / \Delta(d \cdot \nabla H)$ . Как видно из рис. 1, подвижность ЦМД находится в прямой зависимости от величины  $H_p$ , так что параметр  $\alpha_{ef}$  по мере увеличения  $H_p$  от 300 до 450 Э уменьшается от 0.0062 до 0.0031, приближаясь к величине  $\alpha_{MP}$ . Подобный эффект на других ФГП наблюдался ранее [2], однако однозначного понимания его природы нет до настоящего времени. Эффект наблюдается только в “высокоподвижных” ФГП, так как в “малоподвижных” уже при  $H_p = 0$  имеет место совпадение величин  $\alpha_{ef}(\mu_{DW})$  и  $\alpha_{FMR}$  [2]. В “высокоподвижных” ФГП совпадение указанных величин имело место только при чрезвычайно малой величине продвигающего поля —  $0.01 \text{ Э}$  и  $H_p = 5 \text{ Э}$  [7].

Эти результаты можно рассматривать как аргумент в пользу гипотезы, согласно которой в “высокоподвижных” ФГП из-за малой величины критического поля продвижения эксперимент по динамике ЦМД (ДС) уже изначально оказывается вне пределов линейной области.

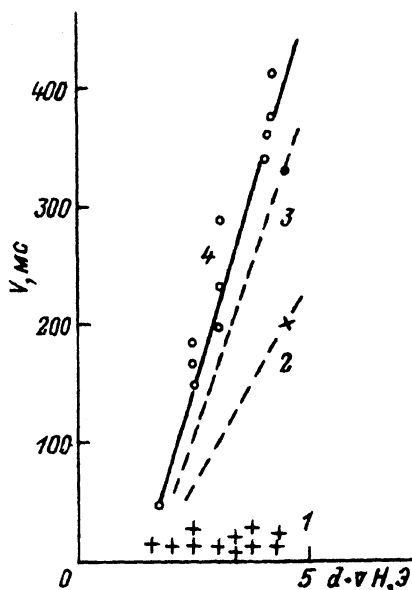


Рис. 1. Зависимости скорости трансляционного движения ЦМД  $V$  от величины продвигающего поля  $(d \cdot \nabla H)$  для ФГП  $(\text{BiLu})_3(\text{FeGa})_5\text{O}_{12}$  (табл. 1). Величины постоянного поля в плоскости: 1 — 0, 2 — 300, 3 — 410, 4 — 450 Э.

При этом движение ДС сопровождается генерацией блоховских линий (БЛ), что резко снижает  $\mu_{DW}$ . Приложение поля  $H_p$  способствует "очищению" ДС от БЛ и восстановлению структуры блоховской ДС с соответствующим повышением  $\mu_{DW}$ .

В таком случае можно ожидать, что в эксперименте с большими продвигающими полями приложение достаточно большого поля  $H_p$  должно обеспечить снижение  $\alpha_{ef}$  до величины  $\alpha_{FMR}$ . В большинстве исследований такого рода применялось поле  $H_p \leq 400$  Э и при этом сохранялось значительное различие в указанных величинах [2]. Наши исследования показывают, что в поле

$$H_p \approx \frac{1}{3} \cdot \frac{2K_u}{M_S}$$

равенство указанных величин не наступает, но при этом  $\alpha_{ef}$  будет тем ниже, чем ниже  $\alpha_{FMR} = \Delta H_{FMR} \gamma / 2\omega$ . Дальнейшее увеличение  $\alpha_{ef}$  нецелесообразно из-за неизбежных изменений исходной доменной структуры. Возникает вопрос о минимальном уровне  $\Delta H_{FMR}$  ФГП с ЦМД (т.е. ФГП с диамагнитным разбавлением тетраэдрической подрешетки феррита-граната). Известно, что в ФГП  $\text{Y}_3\text{Fe}_5\text{O}_{12}$   $\Delta H_{FMR} = 0.3-0.5$  Э, но, приняв специальные меры, можно получить  $\Delta H_{FMR} = 0.15$  Э [8]. Можно было бы ожидать столь же малой величины  $\Delta H_{FMR}$  в ФГП  $(\text{BiYLu})_3(\text{FeGa})_5\text{O}_{12}$ , поскольку замещения немагнитными или сферическими ионами  $\text{Bi}^{3+}$ ,  $\text{Ga}^{3+}$ ,  $\text{Lu}^{3+}$  не изменяют механизм релаксации, присущий ЖИГ [2,5]. В действительности в таких ФГП  $\Delta H_{FMR} > 2$  Э, как это следует из табл. 2.

Сопоставляя наши данные по образцам 2,3,4 с данными других авторов, можно видеть, что уменьшение намагниченности ФГП сопровождается уширением линии ФМР. При этом прослеживается и количе-

Таблица 2.

Номер образца	Состав ФГП	$4\pi M_S$ , Гс	$\Delta H_{FMR}$ , Э	Источник
1	$Y_3Fe_5O_{12}$	1760	0.15	[8]
2	$Y_3(FeSc)_5O_{12}$	1800	0.26	Данная работа
3	$Bi_{0.8}Lu_{2.2}Fe_5O_{12}$	1800	0.5	" "
4	$Bi_{1.0}Lu_{2.0}Fe_{3.8}Ga_{1.2}O_{12}$	160	7.5	" "
5	$Bi_{1.1}Li_{1.9}Fe_{3.9}Ga_{1.1}O_{12}$	270	5.0	[3]
6	$(BiYLu)_3(FeGa)_5O_{12}$	330	5.8	[4]
7	$(BiYLu)_3(FeGa)_5O_{12}$	600	2.8	[4]
8	$(BiYCa)_3(FeSi)_5O_{12}$	600	4.3	[9]

ственная связь: уменьшение  $4\pi M_S$  на порядок величины сопровождается увеличением  $\Delta H_{FMR}$  также на порядок величины.

Такая связь указывает на ионный (спин-решеточный) механизм релаксации, при котором действует соотношение [10]

$$2\Delta H_{FMR} \sim \frac{1}{M_S} \cdot \Omega P, \quad (3)$$

где  $\Omega$  — релаксационный множитель, зависящий от частоты;  $P$  — множитель, не зависящий от частоты.

Ранее такая корреляция была экспериментально исследована в ФГП с быстрорелаксирующими ионами ( $Sm^{3+}$ ,  $Eu^{3+}$ ), в которых как раз и должен проявляться указанный механизм релаксации [11]. Обнаружение такой корреляции в нашем случае может указывать на присутствие в ФГП примесей ионов с сильной спин-орбитальной связью, например  $Fe^{2+}$ , присутствие которого в ФГП  $(BiLu)_3(FeGa)_5O_{12}$  приводит к увеличению  $\Delta H_{FMR}$  до 30–40 Э [3]. Нельзя также исключать присутствие примесей быстрорелаксирующих редкоземельных ионов вследствие неидеальной очистки исходных окислов иттрия и лютеция.

Если вышеприведенные рассуждения верны, то можно рассматривать величину  $4\pi M_S$  как фактор повышения  $\mu_{DW}$ . Исходя из результатов данного исследования, сделаем оценку предельных значений  $\mu_{DW} = 2\mu_{CMD}$  и  $V_{CMD}^{max}$ , которые могут быть достигнуты в ФГП  $(BiLu)_3(FeGa)_5O_{12}$ , продуцируемых по описанной технологии, при соответствующей оптимизации состава, условий роста и увеличении  $H_p$  до 1000 Э (что в принципе возможно). По условию  $d = h = 5$  мкм увеличение  $4\pi M_S$  связано с увеличением  $K_u$  соотношением [5]

$$d_{CMD} = 8\sqrt{A \cdot K_u} / \pi M_S^2 = 5 \cdot 10^{-4} \text{ см.} \quad (4)$$

Величина  $K_u$  определяется также из условия

$$1/3 \cdot (2K_u / M_S) = H_p = 1000 \text{ Э.} \quad (5)$$

Решая систему уравнений (4) и (5), получаем искомые величины  $4\pi M_S = 230$  Гс и  $K_u = 2.7 \cdot 10^4$  эрг  $\cdot$  см $^{-3}$  (как показано в [4], такая величина  $K_u$  реально достижима). В соответствии с (3) можно ожидать

уменьшения  $\alpha_{ef}$  (табл. 1) до величины 0.0022, при этом численные значения подвижности и предельной скорости, согласно (1) и (2) составляет  $\mu_{DW} = 200 \text{ м} \cdot \text{с}^{-1} \cdot \text{Э}^{-1}$  и  $V_{CMD}^{\max} = 690 \text{ м} \cdot \text{с}^{-1}$ . В обобщенном виде взаимосвязь всех вышеуказанных факторов имеет вид

$$V_{DW}^{\max} \sim \gamma^4 \sqrt{AK_u}, \quad (6)$$

$$\mu_{DW} \sim \gamma \cdot \sqrt[4]{A^3/K_u}. \quad (7)$$

Как следует из (6) и (7), повышение предельной скорости движения ПМД за счет повышения  $K_u$  и соответствующего повышения  $H_p$  должно сопровождаться столь же быстрым снижением подвижности, допустимый предел которой определяет, таким образом, частотную характеристику магнитооптического затвора на ПМД. Поднять этот предел можно, снизив  $\alpha_{FMR}$  за счет дальнейшего снижения содержания примесей быстрорелаксирующих ионов в ФГП.

Вышеприведенный анализ сделан в предположении, что взаимодействие ДС с полем напряжений, локализованным вблизи края проводниковых шин схемы управления, достаточно мало. В противном случае именно это взаимодействие, а не величина подвижности будет определять плотность тока в схеме управления. Природа этого взаимодействия определяется обратным магнитоупругим эффектом, благодаря которому при переходе из области сжатия в область растяжения (или наоборот) ДС претерпевает изменение поверхностной плотности энергии (вследствие изменения  $K_u$ ). Выражение для силы, действующей при этом на ПМД в терминах поля продвижения, необходимого для отрыва (старта) ПМД  $\Delta H_{st}$ , согласно формализму Дипмана, имеет вид [12]

$$\Delta H_{st} \sim \lambda_{111}/h(2K_u/M_S), \quad (8)$$

где  $\lambda_{111}$  — константа магнитострикции ФГП.

Возможность минимизации величины  $\Delta H_{st}$  была исследована на "модельных" ФГП, состав и свойства которых приведены в табл. 3.

Здесь образец 1 — типичная ФГП с ПМД, изготавливаемая серийно и использованная для сравнения. Образцы 2 и 3 получены в данной работе методом эпитаксии из растворов в расплаве на основе  $\text{BaF}_2\text{-B}_2\text{O}_3\text{-BaO-PbO}$ , с содержанием  $\text{MnO}_2$  2.5 и 1.3 мол. % соответственно. За счет вхождения небольшого количества ионов  $\text{Mn}^{3+}$ , дающих положительный вклад в величину  $\lambda_{111}$  [13], достигалось увеличение  $\lambda_{111}$  от исходной  $\lambda_{111} < 0$  до  $\lambda_{111} \simeq 0$  и  $\lambda_{111} > 0$ . На рис. 2 представлена зависимость величины  $\Delta H_{st}$  от местоположения ПМД относительно края аппликации из сплава  $\text{Al-Cu}$ , напыленного слоем

Таблица 3.

Номер образца	Состав ФГП	$\lambda_{111} \cdot 10^6$	$d$ , мкм	$h$ , мкм	$K_u/2\pi M_S^2$
1	$(\text{YSmEuLuCa})_3(\text{FeGe})_5\text{O}_{12}$	-2.0	3.0	3.0	7.0
2	$(\text{YEuTm})_3(\text{FeGaMn})_5\text{O}_{12}$	0	3.0	3.0	6.0
3	$(\text{YEuTm})_3(\text{FeGaMn})_5\text{O}_{12}$	0.0	5.0	5.0	7.0

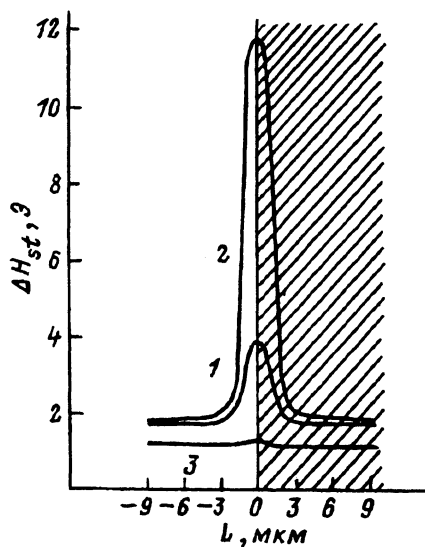


Рис. 2. Зависимость поля старта ПМД  $\Delta H_{st}$  от расстояния  $L$  до края аппликации. Цифровые обозначения кривых соответствуют номерам образцов в табл. 3.

$\sim 0.1$  мкм на поверхность трех указанных образцов ФГП. Заштрихованная область на рисунке соответствует поверхности ФГП под слоем Al-Cu, незаштрихованная — свободной поверхности. Параметр  $L$  характеризует удаление ПМД от края аппликации в момент измерения  $\Delta H_{st}$  по методу Велла-Колейро [6]. Как следует из рис. 2, наличие локальных напряжений вблизи края аппликации создает определенный потенциальный барьер, для преодоления которого требуется приложить к ПМД дополнительное продвигающее усилие (т.е. увеличить амплитуду токового импульса в проводниках схемы продвижения). Этот барьер, относительно небольшой в стандартном образце 1, существенно возрастает в образце 2 и практически полностью исчезает в образце 3 с нулевой магнитострикцией.

Такой результат, перенесенный на Vi-замещенные ФГП, открывает реальную перспективу снижения амплитуды токовых импульсов, переключающих магнитооптические затворы при формировании двумерного оптического изображения.

Таким образом, проведенные исследования показывают возможность получения ФГП  $(\text{BiLu})_3(\text{FeGa})_5\text{O}_{12}$  с 5-микронными ПМД, при использовании которых для формирования двумерного оптического изображения (пространственного модулятора света) может быть обеспечено время переключения единичного магнитооптического элемента  $\tau \leq 10^{-8}$  с. При этом должна обеспечиваться минимальная амплитуда переключающего токового импульса как следствие рекордно высокой подвижности.

Отметим, что весьма низкая величина  $\alpha_{FMR}$ , определившая высокую подвижность, получена в ФГП, выращенных из бессвинцового растворителя и, следовательно, не содержащих пары  $\text{Pb}^{2+} - \text{Pb}^{4+}$ , обеспечивающей благоприятный механизм зарядовой компенсации [3]. Возможной причиной этого является низкая коррозионная активность нового растворителя по отношению к платине и соответственно малое

содержание ионной пары  $Pt^{4+}-Fe^{2+}$ , ответственной в структуре ФПГ за уширение линии ФМР  $\Delta H_{FMR} \sim \alpha_{MP}$ .

### Список литературы

- [1] *Заболотная Н.В., Осико В.В., Рандошкин В.В. и др. // Письма в ЖТФ. 1984. Т. 10. Вып. 13. С. 788-792.*
- [2] *Малоземов А., Слонзуски Дж. Доменные стенки в материалах с цилиндрическими магнитными доменами. М.: Мир, 1982. 382 с.*
- [3] *Батмезов В.Е., Ким Т.А., Рандошкин В.В. и др. // ЖТФ. 1985. Т. 55. Вып. 6. С. 1227-1230.*
- [4] *Robertson J.M., Algra H.A., Breed D.J. // J. Appl. Phys. 1981. Vol. 52. N 3(II). P. 2338-2340.*
- [5] *Элементы и устройства на ЦМД. Справочник / Под ред. Н.Н.Евтихиева, Б.Н.Наумова. М.: Радио и связь, 1987. 488 с.*
- [6] *Vella-Coleiro G.P., Tabor W.I. // Appl. Phys. Lett. 1972. Vol. 21. P. 7-8.*
- [7] *Argyle B.E., Jants W., Slonczewsky J.C. // J. Appl. Phys. 1983. Vol. 54. N 6. P. 3370-3386.*
- [8] *Glass H.L., Elliott M.T. // J. Cryst. Groth. 1976. Vol. 34. P. 285-288.*
- [9] *LeCraw R.C., Luther L.C., Georgy E.M. // J. Appl. Phys. 1982. Vol. 53. N 3. P. 2481-2482.*
- [10] *Гуревич А.Г. Магнитный резонанс в ферритах и антиферромагнетиках. М.: Наука, 1973. 591 с.*
- [11] *Волков В.В., Боков В.А., Карпович В.И. // ФТТ. 1982. Т. 24. Вып. 8. С. 2318-2324.*
- [12] *Dischman I.M., Piece R.D., Roman B.J. // J. Appl. Phys. 1974. Vol. 45. N 9. P. 4076.*
- [13] *Breed D.J., Voermans A.B., Nederpel P.Q.J., Van Bakel B.A.H. // J. Appl. Phys. 1983. Vol. 54. N 3. P. 1519-1527.*

Донецкий физико-технический институт

Поступило в Редакцию  
27 мая 1993 г.  
В окончательной редакции  
10 сентября 1993 г.