

05:07

## **Феррит-пьезоэлектрический модулятор света с электрическим и магнитным управлением намагниченностью**

© И.В. Зависляк, В.П. Сохацкий

Киевский национальный университет им. Т. Шевченко, Украина  
E-mail: vso@univ.kiev.ua*Поступило в Редакцию 4 сентября 2012 г.*

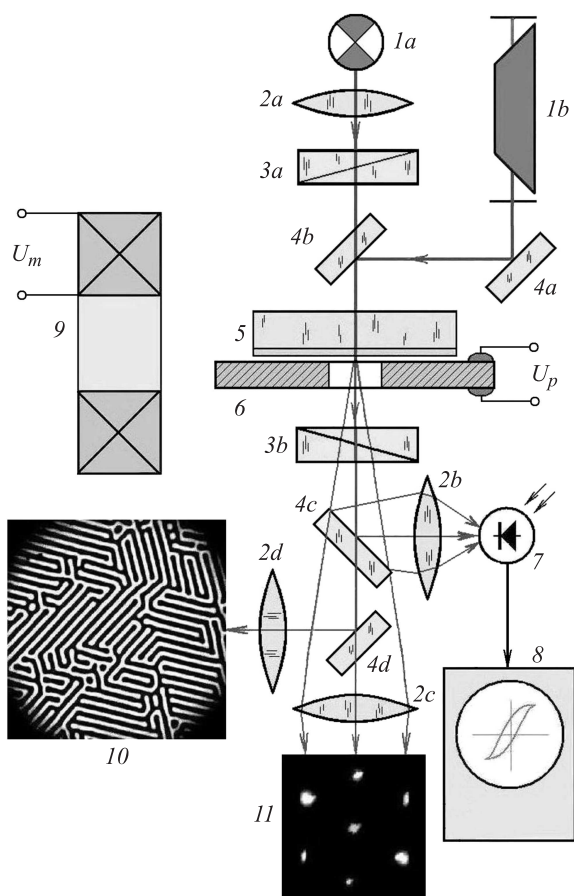
Представлены результаты исследования влияния механических напряжений в пьезопластине цирконата-титаната свинца на доменную структуру жестко связанной с ней эпитаксиальной пленки железо-иттриевого граната. Приложение электрического напряжения к пьезопластине приводило к магнитоупругому изменению анизотропии гранатовой пленки, проявлявшемуся как спин-переориентационный переход вектора намагниченности из направления, перпендикулярного к плоскости пленки в параллельное. Это позволило, в частности, осуществлять магнитооптическую модуляцию проходящего сквозь пленку света. Оценка влияния параметров пленки на переориентацию намагниченности и характеристики светового луча позволила определить оптимальные параметры составной структуры для различных режимов модуляции.

Задача управления параметрами светового луча путем изменения пространственного распределения и величины намагниченности является актуальной для создания устройств оптоэлектроники, спинтроники, квантовых компьютеров. На пути к практической реализации такой задачи стоит ряд проблем, среди которых недостаточно высокая эффективность взаимодействия магнитной подсистемы со световым полем, сложность локализации воздействующего магнитного поля в малом объеме, значительные энергозатраты при использовании внешних источников поля, недостаточное быстроедействие и проч. Для решения этих проблем в последние годы активно исследуются различные методы воздействия на намагниченность, например с помощью поляризованного тока или магнитоэлектрического эффекта [1]. Однако сложности использования таких методов, в частности из-за необходимости использования больших плотностей тока или высоких напряжений, вынуждают

разрабатывать новые способы их реализации, искать иные методы перемагничивания.

В данной работе реализован и исследован метод перемагничивания, основанный на магнитоупругом эффекте, приводящем к изменению направления намагниченности под действием механических напряжений. Вариантом конструктивной реализации такого метода является композитная структура из магнитооптической пленки железо-иттриевого граната (ЖИГ) —  $Y_3Fe_5O_{12}$ , выращенной эпитаксиально в плоскости (111) на подложке из галлий-гадолиниевого граната ( $Gd_3Ga_5O_{12}$ ) и жестко связанной (приклеенной) с пьезоэлектриком — пьезокерамической пластиной цирконата-титаната свинца (PZT)  $Pb[Zr_{0.52}Ti_{0.48}]O_3$ , подобно описанной в [2,3]. Пьезопластина имела форму диска с металлизированными поверхностями для припаивания контактов. Диаметр диска ( $D = 1$  см) заведомо превышал размеры пленочного образца ЖИГ. В центре диска высверливалось отверстие диаметром  $d = 2$  мм для пропускания света. При приложении напряжения к пьезопластине, возникающие в ней деформации создают механические напряжения в жестко связанной с ней (приклеенной) пленке ЖИГ, растягивая либо сжимая ее в направлении приложения напряжения. Такие деформации приводят к наведению одноосной анизотропии с осью легкого намагничивания, перпендикулярной плоскости пленки при ее натяжении и оси трудного намагничивания при сжатии. В результате вектор намагниченности может изменять свое направление из близкого к перпендикулярному на близкое к параллельному к плоскости пленки, что регистрируется фотоприемником благодаря магнитооптическому эффекту Фарадея, а происходящие при этом изменения доменной структуры (ДС) наблюдаются визуально. Условием проявления такой переориентации намагниченности являются невысокие коэрцитивность и ростовая одноосная магнитная анизотропия пленки ЖИГ, обусловленная механическими напряжениями между пленкой и ее подложкой из-за рассогласования их параметров решетки.

Блок-схема основных узлов экспериментальной магнитооптической установки, позволявшей наблюдать ДС пленки ЖИГ, записывать кривые перемагничивания в зависимости от прикладываемого магнитного поля или электрического напряжения на пьезопластине, наблюдать дифракцию света на ДС, измерять интенсивности и углы отклонения составляющих дифракционного спектра, изображена на рис. 1.

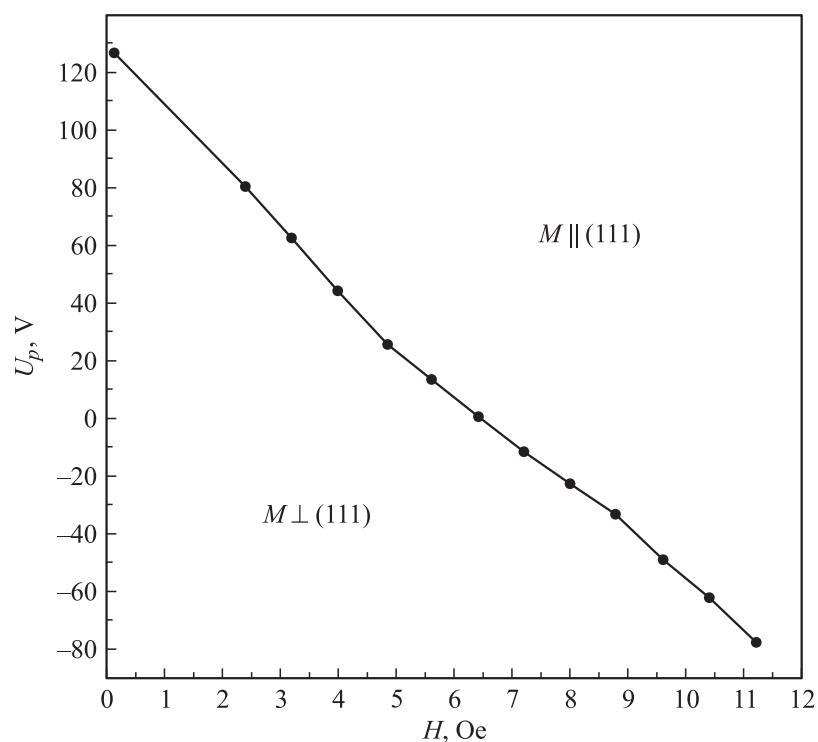


**Рис. 1.** Схема экспериментальной установки для магнитооптических и пьезоэлектрических исследований: 1 — источники света — лампа накаливания (1a), светодиод и/или лазеры (1b) с длиной волны 0.628 и 0.532 nm; 2a–d — линзы оптической системы; 3a, b — поляризаторы; 4a–d — светоделительные элементы; 5 — пленка ЖИГ на галлий-гадолиниевой подложке; 6 — пьезоэлемент из цирконата-титаната свинца, жестко связанный с пленкой ЖИГ; 7 — фотоприемник; 8 — осциллограф для отображения петли магнитного гистерезиса; 9 — катушка для создания магнитного поля; 10 — магнитооптическое изображение ДС, наблюдаемое в микроскоп либо на экране; 11 — спектр дифракции света на ДС ЖИГ.

ДС ЖИГ в равновесном состоянии (при отсутствии либо малом внешнем магнитном поле  $H < 2 \text{ Oe}$ ) имела вид „паркета“ с полосовыми доменами вдоль 3 лежащих в плоскости пленки направлений  $\langle 110 \rangle$ . При приложении в плоскости пленки магнитного поля напряженностью  $2 < H < 6 \text{ Oe}$  вдоль одного из этих направлений, полосовые домены соответственно выстраивались вдоль этого направления. При дальнейшем увеличении поля ( $H > 6 \text{ Oe}$ ) мог наблюдаться скачкообразный переход полосовой ДС в „несимметричное“ состояние с увеличенной шириной доменов с одним направлением намагниченности и уменьшенной — с противоположным. При напряженностях поля  $H \sim 8\text{--}11 \text{ Oe}$  наблюдавшееся ранее в проходящем свете по эффекту Фарадея полосовая ДС исчезала ввиду преимущественной переориентации намагниченности в плоскость. На месте исчезнувшей ДС оставались лишь слабоконтрастные полосовые домены, видимые благодаря оставшейся небольшой составляющей намагниченности на направление луча из-за неполной параллельности намагниченности к плоскости пленки. При дальнейшем увеличении поля разбиение на домены постепенно исчезает вследствие переориентации намагниченности в направлении поля, до полной переориентации намагниченности в плоскость при  $H \geq 40 \text{ Oe}$ .

В отсутствие внешнего магнитного поля механическое напряжение в пленке ЖИГ, возникающие при приложении электрического напряжения  $U_p > 0$  к пьезопластине, изменяют ДС гранатовой пленки тем сильнее, чем больше приложенное пьезонапряжение  $U_p$ . При достижении пьезонапряжением значения  $U_0 = 130 \text{ V}$  намагниченность, до этого перпендикулярная плоскости, переориентируется в плоскость. Это приводит, как и в случае приложения магнитного поля, к исчезновению „фарадеевской“ ДС и образованию нерегулярных доменов различной формы ввиду малости анизотропии и размагничивающих факторов в плоскости. Изменение полярности пьезонапряжения ( $U_p < 0$ ) приводит к переориентации намагниченности ЖИГ в направлении, перпендикулярное плоскости пленки (111), и восстановлению „паркетной“ ДС.

При одновременном воздействии механической деформации и внешнего магнитного поля в пленке ЖИГ формируется полосовая ДС в направлении поля, которая сохраняется и после переориентации намагниченности в плоскость, но уже в виде плоскостных полосовых доменов, видимых на просвет по эффекту Фарадея с низким контрастом. Напряжение на пьезопластине, при котором происходит переориентация намагниченности пленки в плоскость, приблизительно линейно



**Рис. 2.** Зависимость напряжения на пьезопластине  $U_p$ , необходимого для переориентации намагниченности  $M$  пленки ЖИГ в плоскость (111) от прикладываемого в этой плоскости магнитного поля  $H \parallel [110]$ .

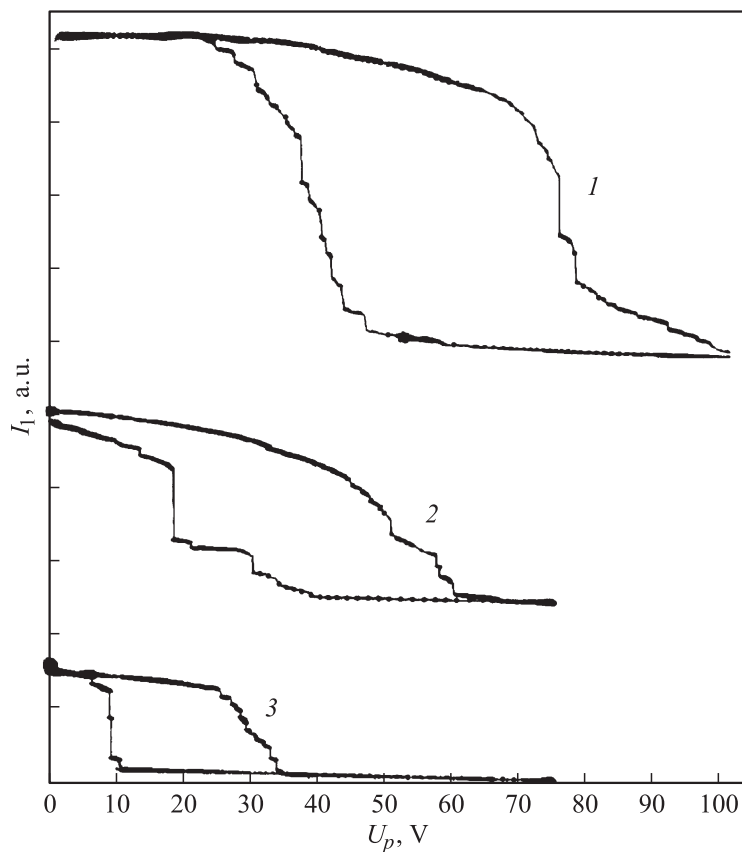
зависит от прикладываемого магнитного поля, монотонно спадая при увеличении напряженности последнего (рис. 2). График позволяет выбрать величины подмагничивающих полей и соответствующих им пьезонапряжений, управляющих намагниченностью для выбора оптимальных режимов воздействия на световой луч. Последний, проходя сквозь пленку с „фарадеевской“ полосовой ДС, дифрагирует, образуя интерференционные максимумы, размещенные в поперечном направлении. Полученные экспериментально значения относительной интенсивности света  $I_1/I$ , дифрагировавшего на ДС пленки ЖИГ толщиной  $h = 10 \mu\text{m}$ ,

составляли  $I_1/I \leq 0.01\%$  и  $I_1/I \leq 0.02\%$  при использованных длинах волн света соответственно  $\lambda = 628$  и  $532$  nm ( $I$  — интенсивность входящего в пленку света). Основными параметрами, определяющими эти значения в соответствии с формулой  $I_1/I = 4\pi^{-2} \sin^2(Fh)e^{-ah}$  были фарадеевское вращение  $F = 0.125$  (0.25) deg/ $\mu\text{m}$  и оптическое поглощение пленки  $a = 620$  (1400)  $\text{cm}^{-1}$  при  $\lambda = 628$  (532) nm.

Переориентация намагниченности в плоскость приводила к исчезновению боковых дифракционных максимумов, наблюдавшемуся визуально и регистрировавшемуся фотоприемником. При подаче переменного напряжения на пьезопластину, ДС и намагниченность пленки ЖИГ также изменялись периодически, модулируя интенсивность дифрагировавшего света в соответствии с характеристиками, представленными квазистатическими гистерезисными кривыми  $I_1(U_p)$  на рис. 3. Рабочая точка (постоянная составляющая пьезонапряжения  $U_c$ ) выбиралась изменением постоянного напряжения смещения. Максимальный выходной сигнал в каждом из трех представленных случаев наблюдался при постоянных напряжениях смещения  $U_c$ , соответствовавших серединам петель гистерезиса на рис. 3. Несмотря на немонотонность кривых  $I_1(U_p)$ , форма выходного напряжения с фотоприемника без искажений повторяла форму входного напряжения на пьезопластине до частоты  $f = 2$  kHz. При дальнейшем увеличении частоты пьезонапряжения искажения выходного сигнала нарастали, а амплитуда монотонно спадала вплоть до 0 при частоте  $f_{\text{max}} = 5$  kHz.

Похожим образом менялась и амплитуда нулевого максимума (не дифрагировавшего света) после прохождения поляризатора-анализатора, обеспечивая в соответствии с формулой  $I_0/I = \cos^2(Fh)e^{-ah}$  абсолютное изменение интенсивности, чуть большее (на коэффициент  $\pi^2/4$ ), чем у 1-го максимума. При изменении направления поля подмагничивания или величины пьезонапряжения полосовая ДС пленка также могла поворачиваться, изменяя пространственное положение дифракционных максимумов.

Таким образом, создаваемые электрическим полем механические напряжения в пьезоэлектрике и передаваемые механически магнетику (пленке), создают в нем упругие напряжения, изменяющие магнитное состояние пленки, что позволяет, в частности, управлять интенсивностью проходящего либо отражающегося светового луча. Очевидным методом повышения эффективности дифракции, а соответственно и модуляции, является увеличение магнитооптической добротности



**Рис. 3.** Интенсивность дифрагирующего на ДС ЖИГ света в зависимости от электрического напряжения, приложенного к пьезопластине при различных полях подмагничивания  $H$ : 1 —  $H_1 = 0$  Ое; 2 —  $H_2 = 2$  Ое; 3 —  $H_3 = 3.5$  Ое.

пленки ЖИГ, оптимизация режима подмагничивания и пропускания оптического луча. Подобные композитные структуры из пьезоэлектрического и магнитооптического материалов могут найти применение в оптоэлектронике или спиновой электронике для создания новых типов электро-, магнито- или оптически управляемых спиновых клапанов, ячеек памяти, датчиков магнитных полей.

**Список литературы**

- [1] *Wu T., Bur A., Wong K., Hockel J.L., Hsu C.-J., Kim H.K.D., Kang L., Carman G.P.* // J. Appl. Phys. 2011. V. 109. P. 07D732.
- [2] *Попов М.А., Зависляк И.В.* // Письма в ЖТФ. 2012. Т. 38. В. 18. С. 87–94.
- [3] *Фетисов Ю.К., Сринавазан Г.* // Физика конденсированного состояния. 2009. Т. 1. В. 1–2. С. 121–128.