



ФЕДЕРАЛЬНАЯ СЛУЖБА  
ПО ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ СОБСТВЕННОСТИ

## (12) ОПИСАНИЕ ИЗОБРЕТЕНИЯ К ПАТЕНТУ

(21)(22) Заявка: 2014118809/28, 08.05.2014

(24) Дата начала отсчета срока действия патента:  
08.05.2014

Приоритет(ы):

(22) Дата подачи заявки: 08.05.2014

(45) Опубликовано: 20.08.2015 Бюл. № 23

(56) Список документов, цитированных в отчете о поиске: JP 2013205400 A, 07.10.2013. RU 2302623 C2, 10.07.2007. RU 2418288 C1, 10.05.2011. JP 2012122835 A, 28.06.2012. US 8283622 B2, 09.10.2012. US 5822063 A, 13.10.1998. US 7075055 B2, 11.07.2006. US 6462539 A, 08.10.2002

Адрес для переписки:

660036, г. Красноярск, Академгородок, 50, стр.  
38, ИФ СО РАН, патентный отдел

(72) Автор(ы):

Косырев Николай Николаевич (RU),  
Заблуда Владимир Николаевич (RU),  
Тарасов Иван Анатольевич (RU),  
Лященко Сергей Александрович (RU),  
Шевцов Дмитрий Валентинович (RU),  
Варнаков Сергей Николаевич (RU),  
Овчинников Сергей Геннадьевич (RU)

(73) Патентообладатель(и):

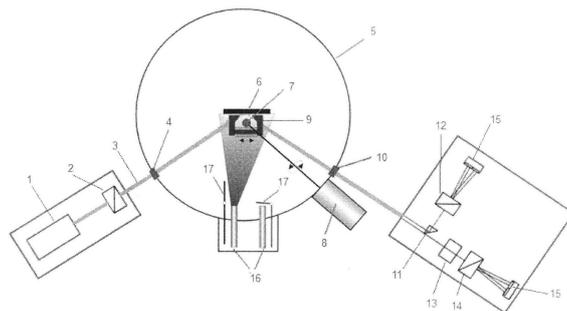
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ  
БЮДЖЕТНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ НАУКИ  
ИНСТИТУТ ФИЗИКИ им. Л.В. Киренского  
Сибирского отделения Российской академии  
наук (RU)

## (54) СПОСОБ ИЗМЕРЕНИЯ МАГНИТООПТИЧЕСКИХ ЭФФЕКТОВ in situ

(57) Реферат:

Изобретение относится к области магнитных и магнитооптических измерений. Способ заключается в том, что исследуемый образец освещают линейно поляризованным световым пучком и измеряют изменение поляризации при отражении, используя разделение отраженного луча на р- и s-компоненты с разложением по амплитуде и фазе, получая на выходе четыре световых пучка. При этом к исследуемому образцу во время проведения измерений прикладывают переменное магнитное поле, при

измерении меридионального эффекта Керра поляризатор фиксируют в положении  $P=0$ , а анализаторы в амплитудном и фазовом каналах  $A_{1,2}=45^\circ$ . Перемагничивание образца осуществляют с помощью вращающегося постоянного магнита и величину поворота плоскости поляризации  $\alpha$ , пропорциональную проекции намагниченности на плоскость падения света, определяют по формуле. Изобретение обеспечивает повышение точности измерения и информативности. 3 ил.



ФИГ.1



FEDERAL SERVICE  
FOR INTELLECTUAL PROPERTY

(51) Int. Cl.  
*G01R 33/12* (2006.01)  
*G01N 21/21* (2006.01)

(12) **ABSTRACT OF INVENTION**

(21)(22) Application: 2014118809/28, 08.05.2014

(24) Effective date for property rights:  
08.05.2014

Priority:

(22) Date of filing: 08.05.2014

(45) Date of publication: 20.08.2015 Bull. № 23

Mail address:

660036, g. Krasnojarsk, Akademgorodok, 50, str. 38,  
IF SO RAN, patentnyj otdel

(72) Inventor(s):

**Kosyrev Nikolaj Nikolaevich (RU),  
Zabluda Vladimir Nikolaevich (RU),  
Tarasov Ivan Anatol'evich (RU),  
Ljashchenko Sergej Aleksandrovich (RU),  
Shevtsov Dmitrij Valentinovich (RU),  
Varnakov Sergej Nikolaevich (RU),  
Ovchinnikov Sergej Gennad'evich (RU)**

(73) Proprietor(s):

**FEDERAL'NOE GOSUDARSTVENNOE  
BJuDZhetNOE UChREZhDENIE NAUKI  
INSTITUT FIZIKI im. L.V. Kirenskogo  
Sibirskogo otdelenija Rossijskoj akademii nauk  
(RU)**

(54) **METHOD OF MEASURING MAGNETOOPTICAL EFFECTS in situ**

(57) Abstract:

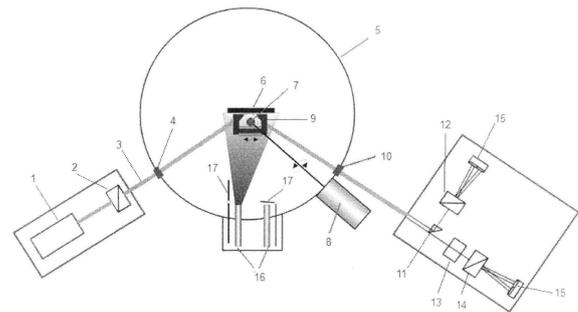
FIELD: physics.

SUBSTANCE: analysed sample is illuminated with a linearly polarised light beam and change in polarisation upon reflection is measured using separation of the reflected beam into p- and s-components with amplitude and phase decomposition to obtain four light beams at the output. An alternating magnetic field is applied to the analysed sample during measurement. The polariser is fixed at position  $P=0$  when measuring the longitudinal Kerr effect and analysers in amplitude and phase channels  $A_{1,2}=45^\circ$ . Remagnetisation of the sample is carried out using a rotating permanent magnet and the polarisation rotation value  $\alpha$ , which is proportional to the projection of magnetisation intensity on the plane of incidence of

light, is determined using a formula.

EFFECT: high measurement accuracy and information value.

3 dwg



ФИГ.1

RU 2 560 148 C1

RU 2 560 148 C1

Изобретение относится к области магнитных и магнитооптических измерений и может быть использовано для быстрой характеристики магнитных материалов, получения спектральных зависимостей магнитооптических эффектов, а также зависимостей магнитооптического сигнала от приложенного магнитного поля. Способ допускает использование стандартных приборов, измеряющих состояние поляризации, серийно выпускаемых эллипсометров для измерения не только классических эллипсометрических углов, но и магнитооптических параметров, позволяющих извлекать информацию о магнитном состоянии образца, в частности получать петли гистерезиса, регистрируя магнитооптический отклик, пропорциональный намагниченности в исследуемом образце.

Известен способ измерения состояния поляризации эллипсометром [п.м. РФ №16314, МПК C01N 21/21, опубл. 20.12.2000], сконструированным по фотометрической схеме, заключающийся в расщеплении отраженного от поверхности исследуемого образца светового пучка на две составляющие, которые измеряют соответственно амплитудные и фазовые изменения света при отражении для р- и s-поляризаций.

Недостатки этого способа заключаются в невысокой точности измерений и узком спектральном диапазоне проведения измерений, а также в случае ферромагнитного образца невозможности регистрировать магнитооптический отклик при воздействии магнитного поля на исследуемую систему.

Наиболее близким техническим решением к заявляемому является способ измерения состояния поляризации эллипсометром [патент РФ №2302623, МПК: 6 C01N 21/21, опубл. 10.07.2007 (прототип)], заключающийся в том, что в конструкции также используется фотометрическая схема, позволяющая минимизировать время единичного измерения таким образом, что данную конфигурацию можно адаптировать для измерения магнитооптических эффектов.

Технический результат заключается в повышении точности измерения и информативности с целью измерения магнитооптических эффектов *in situ*.

Технический результат достигается тем, что в способе измерения магнитооптических эффектов *in situ*, заключающемся в том, что исследуемый образец освещают линейно поляризованным световым пучком и измеряют изменение поляризации при отражении, используя разделение отраженного луча на р- и s-компоненты с разложением по амплитуде и фазе, получая на выходе четыре световых пучка с интенсивностями  $I_1$ ,  $I_2$ ,  $I_3$ ,  $I_4$ , новым является то, что к исследуемому образцу во время проведения измерений прикладывают переменное магнитное поле, при измерении меридионального эффекта Керра поляризатор фиксируют в положении  $P=0$ , а анализаторы в амплитудном и фазовом каналах  $A_{1,2}=45^\circ$  и перемагничивание образца осуществляют с помощью вращающегося постоянного магнита, в этом случае величину поворота плоскости поляризации  $\alpha$ , пропорциональную проекции намагниченности на плоскость падения света определяют по формуле:

$$\alpha = \frac{I_1 - I_2}{2(I_1 + I_2)},$$

где  $\alpha$  - угол поворота плоскости поляризации,  $I_1$   $I_2$  - интенсивности р- и s-компонент в амплитудном измерительном канале плеча анализатора, а при измерении экваториального эффекта Керра образец перемагничивают с помощью электромагнита, поляризатор фиксируют в положении  $P=\pm 45^\circ$ , а анализаторы в амплитудном и фазовом каналах  $A_{1,2}=45^\circ$ , при этом магнитооптический отклик, пропорциональный

интенсивности р-компоненты определяют по формуле:

$$\beta = kI_1,$$

где  $\beta$  - сигнал экваториального эффекта Керра,  $I_1$  - интенсивность в амплитудном канале,  $k$  - коэффициент пропорциональности, зависящий от параметров исследуемого образца.

Отличия заявляемого способа от наиболее близкого аналога заключаются в том, что к исследуемому образцу во время проведения измерений прикладывают переменное магнитное поле, а также в используемом математическом аппарате при вычислении значений магнитооптического сигнала. Эти отличия позволяют сделать вывод о соответствии заявляемого технического решения критерию «новизна». Признаки, отличающие заявляемое техническое решение от прототипа, не выявлены в других технических решениях при изучении данной и смежной областей техники и, следовательно, обеспечивают заявляемому решению соответствие критерию «изобретательский уровень».

На фиг. 1 представлена схема магнитоэллипсометрического комплекса *in situ*.

Устройство для измерения магнитооптических эффектов *in situ* (Фиг.1) состоит из источника света 1 (HeNe лазер), поляризатора 2, составляющих плечо поляризатора, высоковакуумных окон 4 и 10 для ввода и вывода оптического луча, соответственно, высоковакуумной камеры 5, исследуемого образца 6. Для создания переменного магнитного поля в плоскости образца используются не нарушающие оптическую схему вращающийся шаговым двигателем манипулятор 8 с постоянным NdFeV магнитом 7 (для измерения меридионального эффекта Керра (МЭК) или электромагнит 9 (для измерения экваториального эффекта Керра (ЭК)). Кроме того, техническое исполнение выполнено таким образом, чтобы при измерении МЭК использовалась только р-компонента пучка. Также во время измерений точность повышается за счет усреднений массивов данных, полученных за несколько оборотов манипулятора 8 в случае измерения МЭК, а в случае измерения ЭК накопление данных производится за несколько периодов перемагничивания. Плечо анализатора магнитоэллипсометрического комплекса состоит из светоделительного элемента 11, фазосдвигающего элемента 13, призм Волластона 12, 14, двухплощадных фотоприемников 15. Также на фиг. 1 показаны неотъемлемые составляющие ростовой вакуумной камеры для нанесения тонких слоев и покрытий: молекулярные источники (испарители) 16 и их заслонки 17.

Измерения магнитооптического эффекта Керра происходят следующим образом.

Световой поток 3, испускаемый осветителем 1, линейно поляризуется поляризатором 2, и, проходя через сверхвысоковакуумное окно 4, попадает внутрь сверхвысоковакуумной камеры 5, и затем падает на поверхность исследуемого образца 6. Во время измерений к образцу подводится магнитное поле либо с помощью постоянного магнита 7, приводимого в движение с помощью манипулятора 8, либо с помощью электромагнита 9. Падающий, линейно поляризованный световой пучок отражается от поверхности образца, находящегося под воздействием магнитного поля, с изменением состояния поляризации, обусловленным эффектом Керра в магнитном образце, и становится, в общем случае, эллиптически поляризованным и, в таком состоянии, выходя из высоковакуумной камеры через высоковакуумное окно 10, поступает в плечо анализатора, а именно, на композиционный расщепитель светового пучка 11, расщепляющий отраженный исследуемым образцом световой пучок на две световые компоненты, одна из которых попадает в амплитудный измерительный канал  $\psi$ , где призма Волластона 12 разделяет входной световой пучок на р- и s-компоненты,

интенсивности которых затем регистрируются двухплощадным фотоприемником 15. Другая часть светового пучка попадает в фазовый измерительный канал  $\Delta$ , где, проходя через фазосдвигающий элемент 13 и призму Волластона 14, также регистрируются фотоприемниками 15.

5 В итоге мы имеем четыре значения интенсивности  $I_1, I_2, I_3$  и  $I_4$ , из которых вычисляют значения классических эллипсометрических углов  $\psi$  и  $\Delta$ . При проведении таких измерений оптические поляризационные элементы могут принимать следующие фиксированные положения:

- поляризатор:  $P=0$  или  $\pm 45^\circ$ ;
- 10 - анализатор в канале  $\psi$ :  $A_1=0$  или  $45^\circ$ ;
- компенсатор -  $C=0^\circ$ ;
- анализатор в канале  $\Delta$ :  $A_2=0$  или  $45^\circ$ .

15 Из доступных конфигураций оптических элементов [Швец и др. Оптика и спектроскопия, 2004, том 97, №3, С. 514-525] наиболее практичной является конфигурация, при которой оптические элементы находятся в положениях:  $A_1=0, C=0, A_2=45$  (конфигурация I) и  $A_1=45, C=0, A_2=45$  (конфигурация II). Для отмеченных конфигураций выполняются следующие соотношения между эллипсометрическими параметрами и измеренными сигналами:

20 Конфигурация I:

$$F_\psi = -\cos 2\psi$$

$$F_\Delta = \pm \sin 2\psi \cos(\Delta + \delta_c)$$

Конфигурация II:

25  $F_\psi = \pm \sin 2\psi \cos \Delta$

$$F_\Delta = \pm \sin 2\psi \cos(\Delta + \delta_c)$$

где  $\psi$  и  $\Delta$  - измеряемые эллипсометрические параметры,  $F_\psi = \frac{I_1 - I_2}{I_1 + I_2}$ ,  $F_\Delta = \frac{I_3 - I_4}{I_3 + I_4}$ ,  $\delta_c$

30 - фазовый сдвиг компенсатора,  $I_1, I_2, I_3, I_4$  - сигналы с фотоприемников каналов  $\psi$  и  $\Delta$ . Знак  $\pm$  в формулах соответствует положениям поляризатора  $P=45$  и  $-45^\circ$ .

Эллипсометрические параметры рассчитываются следующим образом:

Конфигурация I:

35 
$$\psi = \frac{1}{2} \arccos(-F_\psi)$$

$$\Delta = p \cdot \arccos(\pm F_\Delta / \sin 2\psi) - \delta_c$$

где значение  $p=1$  или  $-1$ , определяющее диапазон  $\Delta$ , остается неопределенным в рамках данной конфигурации и задается оператором посредством выбора диапазона

40  $\Delta$ .

Конфигурация II:

45 
$$\Delta = \arctg\left(\frac{F_\psi \cos \delta_c - F_\Delta}{F_\psi \sin \delta_c}\right) + m\pi$$

$$\psi = \pm \frac{1}{2} \arcsin\left(\frac{F_\psi}{\cos \Delta}\right) \text{ или}$$

$$\psi = 90^\circ \mp \frac{1}{2} \arcsin\left(\frac{F_\psi}{\cos \Delta}\right).$$

Меридиональный эффект Керра состоит в возникновении s-компоненты при  
 5 отражении линейно поляризованной в плоскости падения волны. При этом вектор  
 поляризации поворачивается на малый угол  $\alpha$ , который и подлежит определению при  
 измерениях на эллипсометре-магнитометре. При измерениях МЭК поляризатор  
 фиксируется в положении  $P=0$ , а анализаторы в каналах  $A_{1,2}=45^\circ$ .

Поворот плоскости поляризации в результате эффекта Керра приводит к  
 10 перераспределению интенсивностей световых потоков, падающих на фотоприемники  
 15 (в зависимости от знака эффекта на одном фотоприемнике интенсивность будет  
 возрастать пропорционально  $\sin 2\alpha$ , а на другом на столько же убывать).

Поворот плоскости поляризации при перемагничивании образца вращающимся  
 магнитным полем для МЭК вычисляют по формуле:

$$15 \quad \alpha = \frac{I_1 - I_2}{2(I_1 + I_2)},$$

где  $\alpha$  - угол поворота плоскости поляризации,  $I_1$   $I_2$  - интенсивности p- и s-компонент  
 в амплитудном измерительном канале  $\psi$  плеча анализатора.

На фиг. 2 представлены результаты измерения МЭК в слое DyNi толщиной 5 нм  
 20 двухслойной структуры Ni[8nm]/DyNi[5nm]. Экспериментальные данные представлены  
 как поворот плоскости поляризации в функции угловой координаты направления  
 магнитного поля по отношению к произвольному направлению в плоскости образца.  
 При измерении экваториального эффекта Керра образец перемагничивают с помощью  
 25 электромагнита 9, поляризатор фиксируют в положении  $P=\pm 45^\circ$ , а анализаторы в  
 каналах  $A_{1,2}=45^\circ$ , при этом магнитооптический отклик пропорционален интенсивности  
 p-компоненты:

$$\beta = kI_1,$$

30 где  $\beta$  - сигнал экваториального эффекта Керра,  $I_1$  - интенсивность в амплитудном  
 канале,  $k$  - коэффициент пропорциональности, зависящий от параметров исследуемого  
 образца.

На фиг. 3 показаны результаты измерений ЭЭК в пленке железа толщиной 10 нм на  
 подложке монокристаллического кремния. Экспериментальные данные представлены  
 35 в виде зависимости сигнала ЭЭК от величины приложенного магнитного поля.

Преимущества заявляемого способа измерения магнитооптических эффектов *in situ*  
 заключаются:

- в расширении возможностей стандартного эллипсометра;
- в возможности проведения измерения при быстром перемагничивании;
- 40 - в возможности проведения спектральных измерений магнитооптических эффектов.

#### Формула изобретения

Способ измерения магнитооптических эффектов *in situ*, заключающийся в том, что  
 исследуемый образец освещают линейно поляризованным световым пучком и измеряют  
 45 изменение поляризации при отражении, используя разделение отраженного луча на p-  
 и s-компоненты с разложением по амплитуде и фазе, получая на выходе четыре световых  
 пучка с интенсивностями  $I_1, I_2, I_3, I_4$ , отличающийся тем, что к исследуемому образцу  
 во время проведения измерений прикладывают переменное магнитное поле, при  
 измерении меридионального эффекта Керра поляризатор фиксируют в положении  $P=$

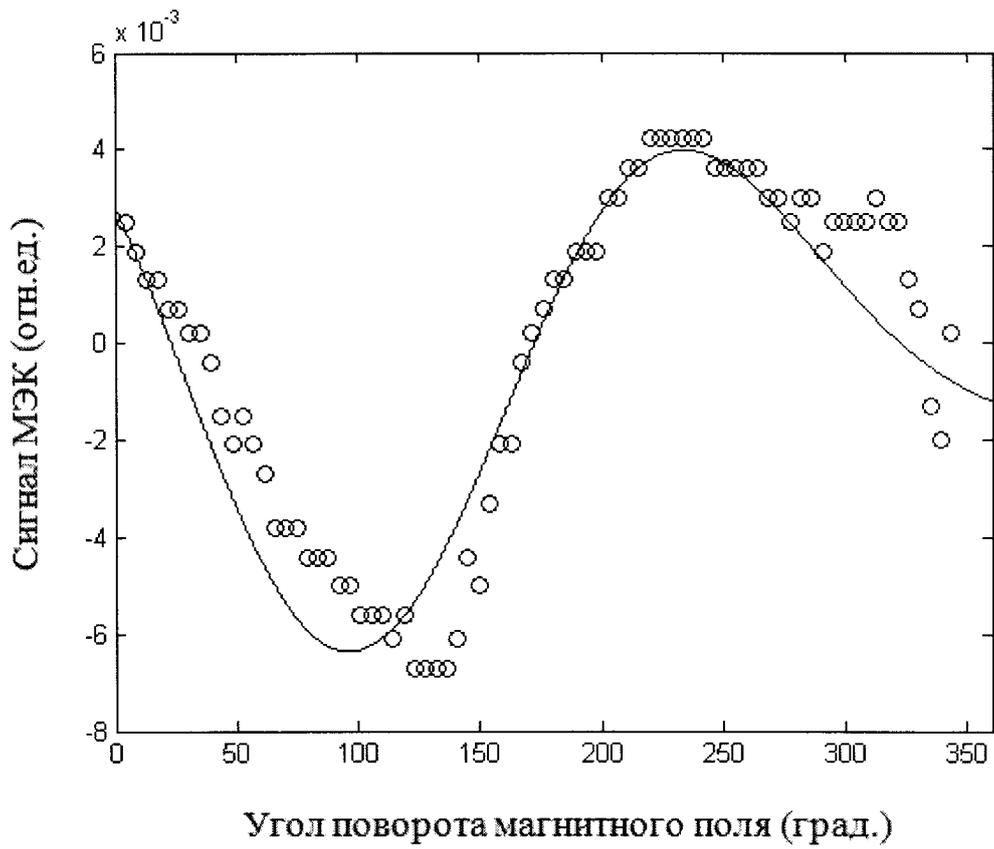
0, а анализаторы в амплитудном и фазовом каналах  $A_{1,2}=45^\circ$  и перемагничивание образца осуществляют с помощью вращающегося постоянного магнита, в этом случае величину поворота плоскости поляризации  $\alpha$ , пропорциональную проекции намагниченности на плоскость падения света определяют по формуле:

$$\alpha = \frac{I_1 - I_2}{2(I_1 + I_2)},$$

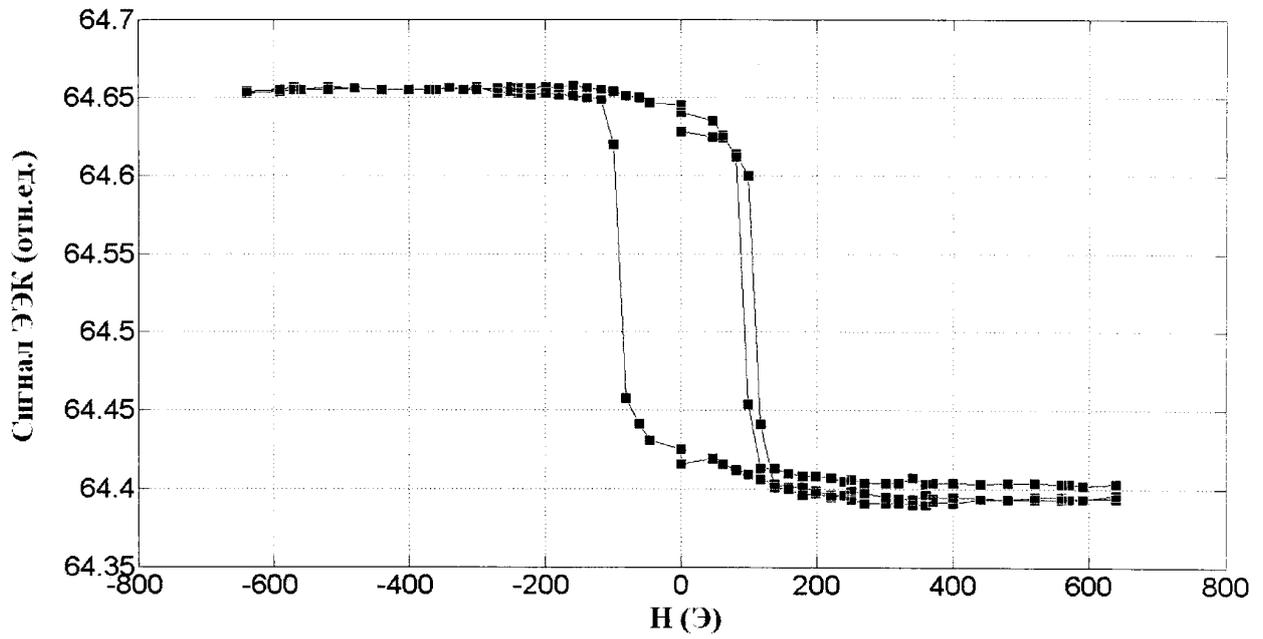
где  $\alpha$  - угол поворота плоскости поляризации,  $I_1, I_2$  - интенсивности р- и s-компонент в амплитудном измерительном канале плеча анализатора, а при измерении экваториального эффекта Керра образец перемагничивают с помощью электромагнита, поляризатор фиксируют в положении  $P=\pm 45^\circ$ , а анализаторы в амплитудном и фазовом каналах  $A_{1,2}=45^\circ$ , при этом магнитооптический отклик, пропорциональный интенсивности р-компоненты определяют по формуле:

$$\beta = kI_1$$

где  $\beta$  - сигнал экваториального эффекта Керра,  $I_1$  - интенсивность в амплитудном канале,  $k$  - коэффициент пропорциональности, зависящий от параметров исследуемого образца.



ФИГ. 2



ФИГ.3