



УДК 520

Исследование возможности использования оптически прозрачных ферримагнетиков для создания малогабаритных быстродействующих фотополариметров

А.В. Скрипец, В.Д. Тронько, М.М. Асанов

Национальный авиационный университет

Данная работа посвящена исследованию влияния доменной структуры оптически прозрачных ферримагнетиков, в частности иттрий-галлиевого феррита-граната, на деполаризацию оптического луча. Показано, что доменная структура оптически прозрачного ферримагнетика находящегося в магнитном поле, меньшем поля насыщения значительно деполаризует проходящий световой луч и, следовательно, снижает чувствительность метода.

ДОСЛІДЖЕННЯ МОЖЛИВОСТІ ВИКОРИСТАННЯ ОПТИЧНО ПРОЗОРИХ ФЕРИМАГНЕТИКІВ ДЛЯ СТВОРЕННЯ МАЛОГАБАРИТНИХ ШВИДКОДІЮЧИХ ФОТОПОЛЯРИМЕТРІВ, Скрипец А.В., Тронько В.Д., Асанов М.М. — Дана робота присвячена дослідженню впливу доменної структури оптично прозорих ферримагнетиків, зокрема іттрий-галієвого фериту-гранату, на деполаризацію оптичного променя. Показано, що доменна структура оптично прозорого ферримагнетика, який знаходиться в магнітному полі, меншому поля насичення, значно деполаризує світловий промінь і отже знижує чутливість методу.

THE RESEARCH OF OPTICALLY TRANSPARENT FERRITES APPLICATION POSSIBILITY FOR PORTABLE HIGH-SPEED PHOTOPOLARIMETERS CREATION, by Skrypets A.V., Tronko V.D., Asanov M.M. — This work is devoted to research of optically transparent ferrites, specifically of yttrium-gallium ferrite-garnet, domain structure influence to optical beam depolarization. It is shown, that domain structure of optically transparent ferrite, which is placed in the magnetic field, less then saturation field, considerably depolarizes passed light beam and, consequently, reduces method sensitivity.

Ключевые слова: полариметрия; оптические свойства ферромагнетиков; деполаризация света.

Key words: polarimetry; ferrites' optical properties; light depolarization.

1. ВВЕДЕНИЕ

Для решения ряда производственных и специальных задач, в частности в космической навигации, возникает необходимость точной пространственной ориентации разнесенных объектов, а именно измерения взаимного разворота объектов и передачи этого направления по вертикали [1–4]. Для этого широко используются фотополариметрические устройства с магнитооптическим модулятором разворота плоскости поляризации на кварце и тяжелом флинте [1, 2, 4]. Реальная амплитуда колебаний плоскости поляризации, создаваемая такими материалами не превышает 1° при переменных магнитных полях с амплитудой порядка $8 \cdot 10^4$ А/м. Для создания таких полей применяют мощные подмагничивающие соленоиды, имеющие значительную постоянную времени ($\tau > 10^{-2}$ с). Большие магнитные поля, габариты, инерционность, малая амплитуда вращения плоскости поляризации светового луча ограничивают возможность использования фотополариметров с парамагнитными магнитооптическими материалами в приборах и системах различного назначения.

Более перспективными материалами для использования в фотополариметрах являются синтезированные для радиотехнических целей ферримагнетики, которые прозрачны не только в радио и СВЧ диапазонах, но и в оптическом, в частности в ближнем ИК диапазоне [5]. Поворот плоскости поляризации в оптически прозрачных ферритах достигает 100° и выше при управляющих магнитных полях порядка $100 \div 200$ А/м [6–8]. Были исследованы методы использования этих материалов в фотополариметрии [9, 10]. Показано ряд преимуществ, в первую очередь резкое снижение мощности управляющих сигналов и уменьшение требований к качеству оптического канала за счет увеличения угла вращения плоскости поляризации света. Чувствительность созданного фотополариметра составляла $1,8''$ и ограничивалась деполаризацией светового луча на доменах ферримагнитного образца.

В данной статье исследуется влияние деполаризации света доменной структурой оптически прозрачным ферримагнитным кристаллом (модулятором) на чувствительность и, следовательно, точность метода.

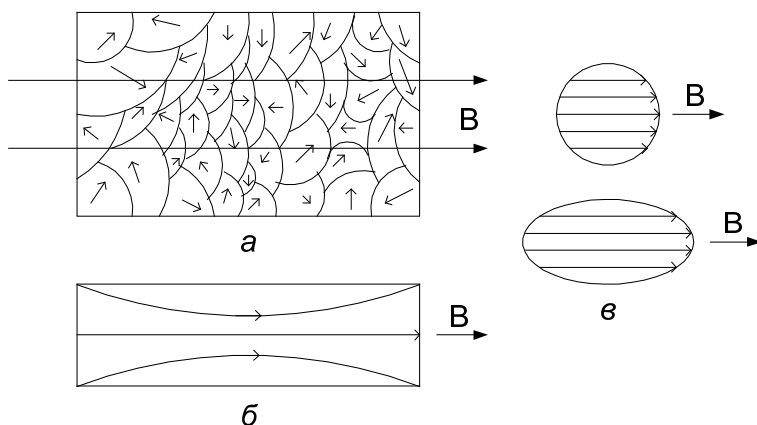


Рис. 1. К объяснению доменной структуры ферримагнетика: *а* — доменная структура ферримагнитного образца в магнитных полях, значительно меньших поля насыщения; *б* — доменная структура ферримагнитного образца в магнитных полях сравнимых и превосходящих поля насыщения; *в* — доменная структура ферримагнитного образца сферической формы и формы эллипсоида вращения в магнитных полях сравнимых и превосходящих поля насыщения.

2. ОПИСАНИЕ

На выходе феррита плоскость поляризации света по поперечному сечению будет изменяться за счет того, что направления намагниченности в каждом домене расположены произвольно (рис. 1,а). За счет того, что поляризация различна в каждой точке кристалла, при суммировании светового потока по всему поперечному сечению на выходе образца луч будет деполаризован. Однако в каждой точке поперечного сечения образца свет поляризован. Рассеиванием луча на доменах можно пренебречь, т.к. изменение показателя преломления Δn на их границе не превышает 10^{-5} [11], т.е. геометрическая форма луча сохраняется.

С ростом внешнего магнитного поля увеличивается размер доменов, намагниченность которых направлена вдоль этого поля. Достигнув полей насыщения, доменная структура исчезает, при этом намагниченность образца будет неоднородной (рис. 1,б). Только образцы в форме сферы и эллипсоида вращения будут однородно намагничены в полях насыщения (рис. 1,в) и, следовательно, в таких образцах деполаризация луча будет отсутствовать.

Матрица Мюллера, описывающая оптически прозрачный ферримагнитный образец модулятора по аналогии с матрицей активного рассеивающего вещества [12, 13] запишется в виде:

$$[P_M] = (1 - R)^2 e^{-\alpha_{\text{П}} z} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & p' \cos 2\varphi & -p' \sin 2\varphi & 0 \\ 0 & p' \sin 2\varphi & p' \cos 2\varphi & 0 \\ 0 & 0 & 0 & a_{44} \end{bmatrix}, \quad (1)$$

где R , $\alpha_{\text{П}}$, z — соответственно коэффициенты отражения и поглощения света модулятором и его толщина; p' — степень поляризации образца¹; φ — угол поворота плоскости поляризации; a_{44} — элемент матрицы, характеризующий деполаризацию круговой компоненты светового потока.

В фотополариметрах падающий на модулятор свет всегда плоскополяризован, поэтому элемент a_{44} нами использован не будет. В первую очередь a_{44} определяется поперечными магнитооптическими явлениями.

Выражение для гиромангнитного эффекта Фарадея в оптически прозрачном ферримагнетике имеет вид [7]:

$$\varphi = \frac{2\pi\sqrt{\varepsilon}}{c} \gamma M,$$

где ε — диэлектрическая проницаемость; γ — гиромангнитное отношение; c — скорость света; M — проекция намагниченности вещества на направление распространения света.

Степень поляризации света после кристалла модулятора определяется выражением:

$$p' = \frac{\Phi_{\text{пол.вых.}}}{\Phi_{\text{вых.}}} \quad (2)$$

где $\Phi_{\text{пол.вых.}}$ — энергия поляризованной составляющей потока на выходе образца; $\Phi_{\text{вых.}}$ — энергия всего потока на выходе образца.

¹Степень поляризации образца обозначается через p' , т.к. параметры p , k_1 , k_2 традиционно введены для поляризационных призм

Энергия светового потока на выходе образца определяется выражением:

$$\Phi_{\text{вых.}} = \int_0^S I(S) dS, \quad (3)$$

где $I(S)$ — интенсивность света на выходе i -го поперечного сечения образца.

Для поляризационных призм выражение для степени поляризации p имеет вид [14]:

$$p = \frac{I_{\text{пол.вых.}}}{I_{\text{вх.}}}$$

где $I_{\text{пол.вых.}}$ — интенсивность поляризованной составляющей света на выходе образца; $I_{\text{вх.}}$ — интенсивность всего света на входе образца.

В случае, когда поляризация по поперечному сечению однородна, в выражении для степени поляризации (2) от энергий можно перейти к интенсивностям.

Исследования деполаризующих свойств оптически прозрачного ферромагнетика за счет доменной структуры можно производить, используя систему, блок-схема которой изображена на рис. 2. Для экспериментального измерения степени поляризации p' образца необходимо регистрировать энергию прошедшего светового потока при расположении анализатора на максимум и минимум пропускания света. Для этого проанализируем фотополариметр с идеальным анализатором.

Для прошедшего через фотополариметр (рис. 2) светового луча вектор Стокса равен:

$$(V_e)_{\text{пр}} = [P_A] [P_M] (V_i),$$

где $(V_i) = \Phi_0 (1 \quad \cos 2\alpha \quad \sin 2\alpha \quad 0)$ — вектор Стокса падающего луча; Φ_0 — энергия светового потока на входе системы; $[P_M]$, $[P_A]$ — соответственно матрицы, описывающие свойства модулятора и анализатора [14].

При исследовании образца с доменной структурой, вектор Стокса падающего луча (V_i) видоизменится, т.к. необходимо использовать не интенсивность I_0 , которая характеризует изменение энергии в каждой точке, а энергию Φ_0 , которая определяется выражением (3).

Энергия прошедшего через фотополариметр светового потока света на выходе определяется выражением:

$$\Phi = (1 - R)^2 e^{-\alpha_{\text{пз}}} \frac{\Phi_0}{2} [1 + p' \cos(\alpha - \beta + \varphi)] \quad (4)$$

где β — азимут анализатора.

Из (4) определим максимальное и минимальное значения светового потока на выходе образца:

при $\alpha - \beta + \varphi = 0$:

$$\Phi_{\text{max вых}} = (1 - R)^2 e^{-\alpha_{\text{пз}}} \frac{\Phi_0}{2} (1 + p'); \quad (5)$$

при $\alpha - \beta + \varphi = \frac{\pi}{2}$:

$$\Phi_{\text{min вых}} = (1 - R)^2 e^{-\alpha_{\text{пз}}} \frac{\Phi_0}{2} (1 - p'); \quad (6)$$

Разделив (6) на (5), получим:

$$\frac{\Phi_{\text{min вых}}}{\Phi_{\text{max вых}}} = \frac{1 - p'}{1 + p'}. \quad (7)$$

По аналогии с поляризационными призмами (параметры k_1 , k_2 [14]) введем параметры k'_1 и k'_2 , соответствующие расположению анализатора на максимум (k'_1) и минимум (k'_2) пропускания света:

$$k'_1 = \frac{\Phi_{\text{max вых}}}{\Phi_{\text{вых}}}; \quad k'_2 = \frac{\Phi_{\text{min вых}}}{\Phi_{\text{вых}}}. \quad (8)$$

Из (7) и (8) выражение для степени поляризации образца запишется в виде:

$$p' = \frac{k'_1 - k'_2}{k'_1 + k'_2} = 1 - 2Gd', \quad (9)$$

где $Gd' = \frac{k'_2}{k'_1 + k'_2}$ — поляризационный дефект кристалла оптически прозрачного ферромагнетика (по

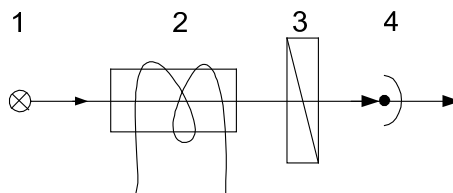


Рис. 2. Блок-схема фотополариметра: 1 — источник плоскополяризованного света; 2 — модулятор; 3 — анализатор; 4 — фотоприемник.

аналогии с таким же параметром поляризационных призм [14]).

Согласно блок-схеме, изображенной на рис. 2, нами была создана экспериментальная установка для исследования влияния модулятора на кристалле оптически прозрачного ферритмагнетика на деполаризацию светового луча. В качестве источника излучения плоскополяризованного света использовался лазер с длиной волны $\lambda = 1,15$ мкм, модулятор выполнен из кристалла иттрий-галлиевого феррита-граната, а анализатор представлял собой призму Глана высокого качества. Результаты, полученные при экспериментальных исследованиях, представлены на рис. 3.

Из рис. 3 видно, что k'_1 увеличивается, а k'_2 уменьшается с увеличением управляющего магнитного поля, т.к. феррит становится однородным по намагниченности, что снижает деполаризацию света в образце. Зависимость степени поляризации кристалла p' от величины управляющего поля была рассчитана по формуле (9) и также представлена на рис. 3. Как видно из рис. 3, степень поляризации с увеличением управляющего магнитного поля растет и при полях, близких к насыщению, достигает значения 0,8.

Погрешность методики измерения угловых поворотов определяется чувствительностью описанной оптической системы, которая в свою очередь связано с отношением сигнала к шуму по мощности. Поэтому для анализа оптического канала, по аналогии с [10, 13], рассчитаем отношение сигнала к шуму по мощности, при этом считаем, что дробовые шумы намного больше всех остальных:

$$\frac{S}{N} = \frac{U_c^2}{U_{др}^2} = A\Delta^2 \frac{4p'^2 \sin^2 2\theta}{1 - p' \cos 2\theta},$$

где $U_c, U_{др}$ — соответственно напряжения, создаваемые сигналом и дробовыми шумами; A — постоянная, зависящая от свойств фотоприемника, θ — угловая амплитуда колебаний плоскости поляризации. Считаем, что она изменяется по периодическому закону: $\theta = \theta_0 \Phi(t)$, где $\Phi(t)$ — произвольная периодическая функция, изменяющаяся во времени с частотой ω .

Считаем, что анализатор в данном случае ориентирован на минимум пропускания света, т.е. плоскость наибольшего пропускания анализатора и плоскость поляризации падающего на него света взаимно перпендикулярны:

$$\varphi - \beta = \frac{\pi}{2} + \Delta.$$

Считаем, что в качестве модулирующих на кристалл оптически прозрачного ферритмагнетика подаются сигналы прямоугольной формы. При модуляции прямоугольными сигналами p' максимально за период модуляции, что позволяет получить максимальное отношение сигнала к шуму на выходе. Выражения для

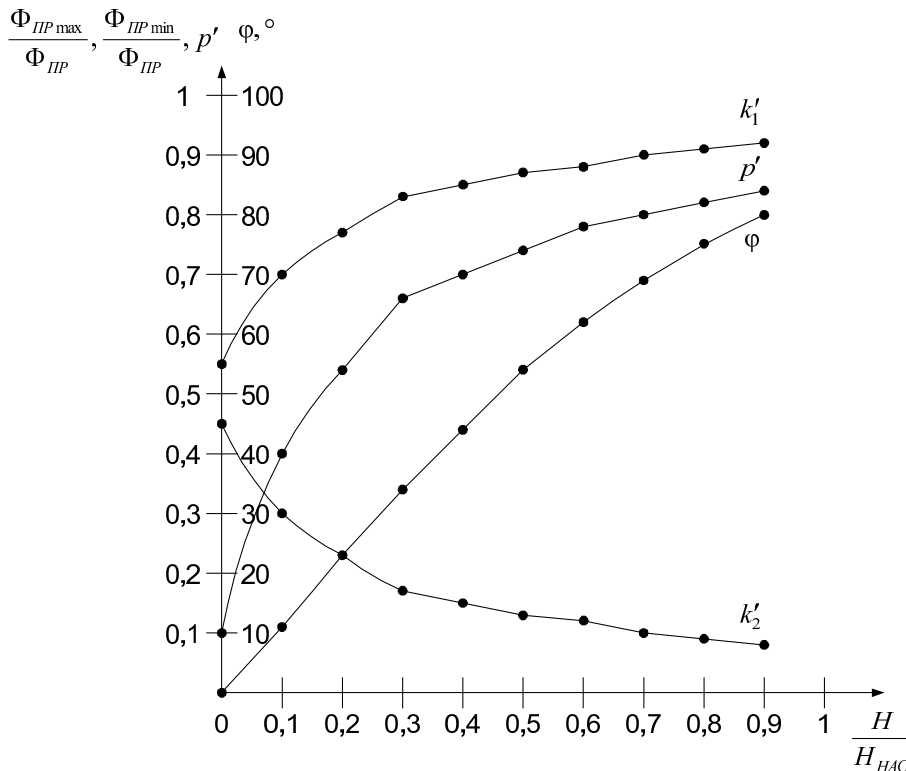


Рис. 3. Графики зависимости $\frac{\Phi_{ПП\max}}{\Phi_{ПП}} \left(\frac{H}{H_{нас}} \right), \frac{\Phi_{ПП\min}}{\Phi_{ПП}} \left(\frac{H}{H_{нас}} \right), \varphi \left(\frac{H}{H_{нас}} \right), p' \left(\frac{H}{H_{нас}} \right)$.

энергии светового потока и отношения сигнала к шуму в этом случае преобразуются к виду:

$$\Phi = (1 - R)^2 e^{-\alpha_{\text{пз}} z} \frac{\Phi_0}{2} [1 - p' \cos 2\theta_0 + 2\Delta p' \sin 2\theta_0]; \quad (10)$$

Основываясь на экспериментальных данных (рис. 3) и выражениях (9), (10), была построена зависимость отношения сигнала к шуму от угла раскачки для иттрий-галлиевого феррита-граната (рис. 4).

Можно считать, что изменение амплитуды угла раскачки плоскости поляризации θ_0 от управляющего магнитного поля соответствует приведенной на рис. 3 зависимости $\varphi\left(\frac{H}{H_{\text{НАС}}}\right)$.

Проанализируем случай, когда исследовалась оптическая система с неидеальным анализатором и идеальным модулятором [9, 10] и сравним его с рассмотренным выше случаем при использовании деполяризующего модулятора и идеального анализатора.

Для оптической системы с неидеальным анализатором и идеальным недеполяризующим модулятором отношение сигнала к шуму имеет вид [9, 10]:

$$\frac{S}{N} = A\Delta^2 \frac{4(1 - 2Gd)^2 \sin^2 2\theta_0}{(1 - Gd)[1 - (1 - 2Gd) \cos 2\theta_0]},$$

где $Gd = \frac{k_2}{k_1 + k_2}$ — поляризационный дефект призм [14].

На рис. 4 изображены графики зависимости отношения сигнала к шуму от угла раскачки для оптической системы с неидеальным модулятором и идеальным анализатором (Кристалл) и системы с идеальным модулятором и неидеальным анализатором при различных значениях Gd .

Из рис. 4 видно, что модулятор на иттрий-галлиевом феррите-гранате существенно деполяризует проходящий световой луч и вносимая им деполяризация соизмерима с влиянием поляризационной призмы с $Gd = 0,2$. Однако, несмотря на вносимую модулятором большую деполяризацию, отношение сигнала к шуму и соответственно чувствительность, уменьшается лишь в 4 раза по сравнению с полностью недеполяризующей оптической системой. Следовательно, применение модуляторов на оптически прозрачных

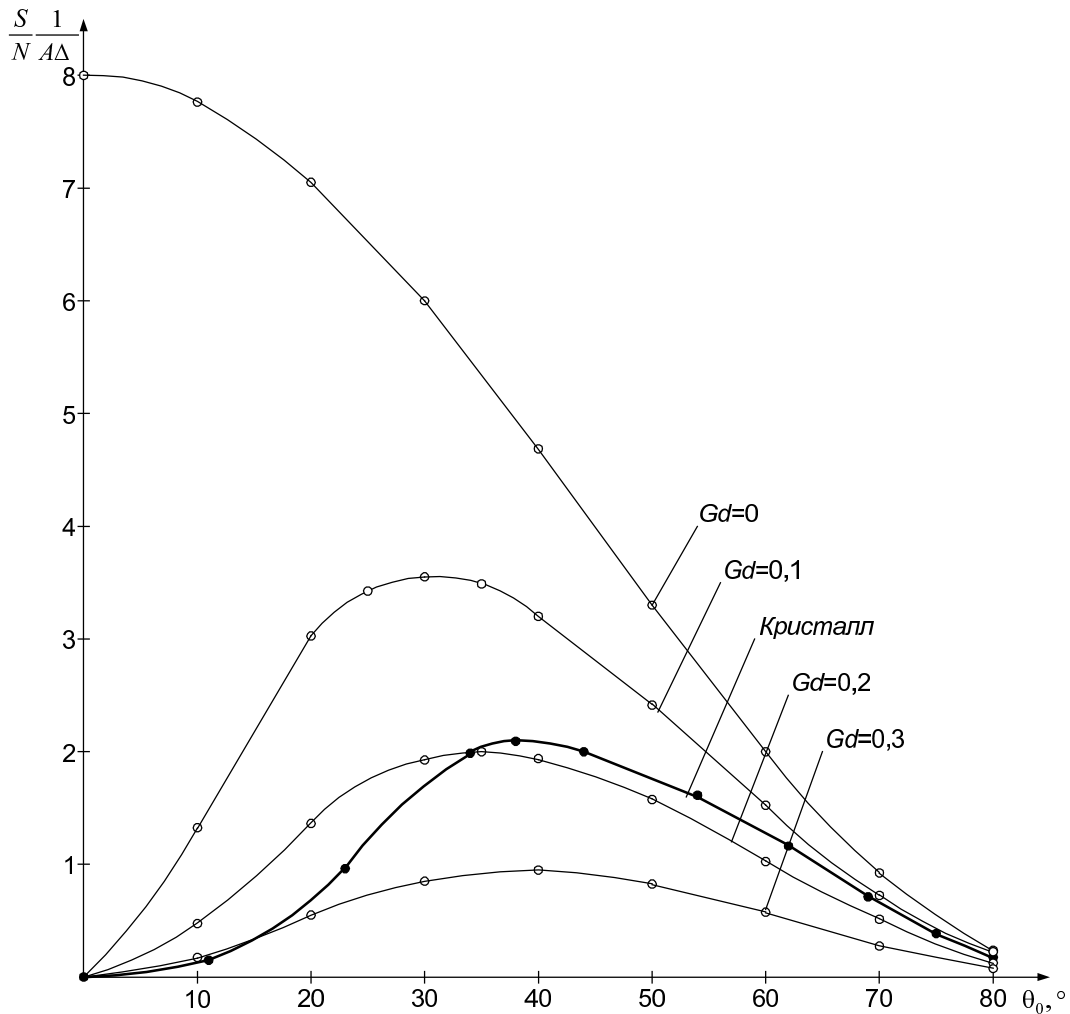


Рис. 4. Зависимость $\frac{S}{N A \Delta^2}(\theta_0)$.

ферромагнетиках позволяет создавать высокоточные, малогабаритные, потребляющие малую мощность фотополариметры и значительно расширить область их применения.

3. ВЫВОДЫ

1. При исследовании влияния доменной структуры образца на проходящее световое излучение следует пользоваться не интенсивностью света, а энергией светового потока, т.к. поляризация, а следовательно, и интенсивность по поперечному сечению такого образца неоднородна.

2. Параметры p' , k'_1 и k'_2 следует определять для каждой оптической системы индивидуально. Так, нами данные параметры определены как отношения энергий светового потока.

3. В образцах с доменной структурой степень поляризации p' зависит от величины управляющего магнитного поля, с увеличением которого также возрастает.

4. Доменная структура оптически прозрачного ферромагнетика находящегося в магнитных полях, меньших поля насыщения значительно деполяризует проходящий световой луч. Так, вносимая деполяризация кристаллом иттрий-галлиевого феррита-граната соизмерима с влиянием поляризационной призмы с $Gd = 0,2$.

5. Несмотря на большую деполяризацию проходящего светового луча отношение сигнала к шуму, а следовательно, и чувствительность уменьшается в 4 раза, по сравнению с полностью недеполяризующей оптической системой и составляет $10''$.

1. А.с. 1448825 СССР, МПК⁵ G 01 C 15/00. Поляриметрическое устройство для передачи горизонтального направления с одного горизонта на другой / Г.А.Фельдман, А.С.Ремизов, С.И.Грызулин, М.А.Рубинштейн (СССР). — № 3951412/10; заявл. 22.08.1985; опубл. 15.12.1991 Бюл. № 46.
2. Пат. 2047836 Российская Федерация, МПК⁶ G 01 G 15/00. Поляриметрическая система измерения взаимного разворота / Добрынин П.Т., Старцев Т.П.; заявитель и патентообладатель Добрынин П.Т., Старцев Т.П. — № 5065619/10; заявл. 13.10.1992; опубл. 10.11.1995.
3. Жуков Ю.П., Ловчий И.Л., Чудаков Ю.И., Швецов И.В. Высокоточное устройство пространственной ориентации объектов // Оптический журнал. — 2009. — **76**, № 9. — С. 56–58.
4. Олендский О.Л., Сокольский М.Н., Трегуб В.П. Поляризационный канал переноса азимутального направления по вертикали // Оптический журнал. — 2009. — **76**, № 10. — С. 11–15.
5. Dillon J.F. Optical Properties of Several Ferrimagnetic Garnets // Journal of Applied Physics. — 1958. — **29**. — P. 539–541.
6. Кринчик Г.С., Четкин М.В. Эффект Фарадея в иттриевом гранате на инфракрасных частотах // Журнал экспериментальной и теоретической физики. — 1960. — **38**, Вып. 5. — С. 1643–1645.
7. Кринчик Г.С., Четкин М.В. Обменное взаимодействие и магнитооптические эффекты в ферритах-гранатах // Журнал экспериментальной и теоретической физики. — 1961. — **41**, Вып. 3 — С. 673–680.
8. Кринчик Г.С., Четкин М.В. Магнитооптические свойства феррит-гранатов в инфракрасной области // Журнал экспериментальной и теоретической физики. — 1961. — **40**, Вып. 3. — С. 729–733.
9. Ванюрихин А.И., Кузнецов Ю.А., Майстренко В.Ф., Тронько В.Д. Регистрация угла плоскости колебания линейно поляризованного инфракрасного излучения // Оптико-механическая промышленность. — 1970. — Вып. 8. — С. 30–33.
10. Дерюгин И.А., Кузнецов Ю.А., Тронько В.Д. Фотоэлектрический поляриметр инфракрасного диапазона // Оптика и спектроскопия. — 1970. — **28**, Вып. 2. — С. 415–418.
11. Смоленский Г.А., Леманов В.В. Ферриты и их техническое применение. — Л.: Наука, 1975. — 219 с.
12. Пат. 2325630 Российская Федерация, МПК⁶ G 01 N 21/21. Способ измерения концентрации оптически активных веществ в мутных растворах и устройство для его осуществления / Пеньковский А.И.; патентообладатель ФГУП «ЦКБ «Фотон». — № 2006135303/28; заявл. 05.10.2006; опубл. 27.05.2008. Бюл. № 15.
13. Пат. 92837 UA, МПК⁹ G 01 N 21/21. Спосіб реєстрації кута повороту площини поляризації світлового потоку в мутних активних середовищах / Скрипець А.В., Тронько В.Д., Асанов М.М.; патентовласник Скрипець А.В., Тронько В.Д., Краснов В.М., Асанов М.М. — № а200904243; заявл. 29.04.2009; опубл. 10.12.2010. Бюл. № 23.
14. Шерклифф У. Поляризованный свет. — М.: Мир, 1965. — 264 с.

Поступила в редакцию 28.09.2011