
СИСТЕМНЫЙ АНАЛИЗ И МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ

4. Воробьев Д. В. Физиологическая характеристика карповых рыб в условиях дельты р. Волги / Д. В. Воробьев, В. И. Воробьев // Естественные науки. – 2008. – № 1 (22). – С. 21–24.
5. Воробьев В. И. Эколого-биологические основы применения микроэлементов в рыбоводстве : автореф. дис. ... д-ра биол. наук / В. И. Воробьев. – М. : МГУ, 1982. – С. 21–23.
6. Костров Б. П. Загрязнение металлами вод и рыб среднего Каспия / Б. П. Костров, А. Н. Панарин // Первый конгресс ихтиологов России. – Астрахань – М. : ВНИРО, 1997. – С. 431.
7. Шелухин Г. К. Некоторые результаты эколого-биохимического мониторинга осетровых в каспийском море / Г. К. Шелухин, А. Р. Шигапова // Экологическая физиология и биохимия рыб : тез. докл. – Ярославль, 2000. – С. 199–200.
8. Эйхенберг Э. Взаимосвязь между необходимостью и токсичностью металлов в водных экосистемах / Э. Эйхенберг // Некоторые вопросы токсичности ионов металлов. – М. : Мир, 1993. – С. 62–87.

References

1. Vorob'ev D. V. Vlijanie temperatury na fiziologicheskij mehanizm obmena cinka pri ego razlichnom postuplenii v organizm belogo amura / D. V. Vorob'ev // Estestvennye nauki. – 2008. – № 1 (22). – S. 18–21.
2. Vorob'ev D. V. Dinamika tjazhelyh metallov v osnovnyh komponentah jekosistem del'ty r. Volgi / D. V. Vorob'ev // Estestvennye nauki. – 2007. – № 3 (20). – S. 11–16.
3. Vorob'ev D. V. Fiziologo-biohimicheskie osnovy primeneniya mikroelementov v akvakul'ture / D. V. Vorob'ev, V. I. Vorob'ev, V. I. Kirillov // Astrahan' : CNEJeP, 2008. – S. 240.
4. Vorob'ev D. V. Fiziologicheskaja harakteristika karpovyh ryb v uslovijah del'ty r. Volgi / D. V. Vorob'ev, V. I. Vorob'ev // Estestvennye nauki. – 2008. – № 1 (22). – S. 21–24.
5. Vorob'ev V. I. Jekologo-biologicheskie osnovy primeneniya mikroelementov v rybovodstve : avtoref. dis. ... d-ra biol. nauk / V. I. Vorob'ev. – M. : MGU, 1982. – S. 21–23.
6. Kostrov B. P. Zagrizaznenie metallami vod i ryb srednego Kaspija / B. P. Kostrov, A. N. Panarin // Pervyj kongress ihtologov Rossii. – Astrahan' – M. : VNIRO, 1997. – S. 431.
7. Sheluhin G. K. Nekotorye rezul'taty jekologo-biohimicheskogo monitoringa osetrovyh v kaspiskom more / G. K. Sheluhin, A. R. Shigapova // Jekologicheskaja fiziologija i biohimija ryb : tez. dokl. – Jaroslavl', 2000. – S. 199–200.
8. Jejhenberg Je. Vzaimosvjaz' mezhdru neobhodimost'ju i toksichnost'ju metallov v vodnyh jekosistemah / Je. Jejhenberg // Nekotorye voprosy toksichnosti ionov metallov. – M. : Mir, 1993. – S. 62–87.

УДК 681.51.011

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ МАГНИТООПТИЧЕСКОГО ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ ТОКА

Ураксеев Марат Абдуллович, доктор технических наук, профессор, Уфимский государственный авиационный технический университет, 453000, Республика Башкортостан, г. Уфа, ул. К. Маркса, 12, e-mail: uta1941@mail.ru.

Авдоница Надежда Алексеевна, кандидат технических наук, филиал Уфимского государственного авиационного технического университета в г. Кумертау, 453300, Республика Башкортостан, г. Кумертау, ул. К. Маркса, 24, e-mail: nadavd672@mail.ru.

Определено состояние поляризации световой волны на выходе оптической системы под действием эффекта Фарадея, где наблюдаемыми величинами являются поворот плоскости поляризации линейно поляризованного излучения, его эллиптичность и изменение его интенсивности при прохождении через магнитоактивный элемент (МАЭ). Показано, что в отсутствие внешнего магнитного поля интенсивность светового излучения определяется по закону Малюса, а при воздействии внешнего магнитного поля плоскость поляризации

линейно поляризованного света в МАЭ будет дополнительно поворачиваться на угол фарадеевского вращения. Установлены факторы, приводящие к потерям света введением коэффициента g , учитывающего отражение и поглощение светового излучения в поляризаторе и в МАЭ и коэффициента p , учитывающего неидеальность системы поляризатор – анализатор в скрещенном положении. С учетом насыщения феррит-гранатовой пленки определены влияния суммарной плотности энергии взаимодействия МАЭ с внешним магнитным полем. Получено выражение, связывающее интенсивность потока светового излучения I на выходе магнитооптического преобразователя тока (МОПТ) с напряженностью внешнего магнитного поля H , приложенного к МАЭ, параметрами пленки и элементами оптической системы. Для определения наибольших влияний параметров на величину интенсивности излучения магнитооптический преобразователь электрического тока проведен анализ математической модели. Определены зависимости интенсивности светового потока от изменения мощности оптического излучения при его прохождении сквозь воздушную среду, оптическую систему преобразователя и волоконный световод. На основании полученных графиков рассмотрены расчетные зависимости интенсивности на выходе МОПТ от параметров оптической системы. Определены зависимости интенсивности светового излучения от электрических и магнитных свойств магнитоактивного элемента магнитооптической системы. На основе анализа полученных зависимостей сделан вывод о влиянии на интенсивность светового излучения различных параметров магнитоактивного элемента при прохождении света через магнитооптический преобразователь электрического тока в виде феррит-гранатовой эпитаксиальной пленки.

Ключевые слова: магнитооптический эффект Фарадея, вращение плоскости поляризации, линейно поляризованный свет, внешнее магнитное поле, состояние поляризации, магнитооптический преобразователь тока, закон Малюса, математическая модель, интенсивность излучения, магнитоактивный элемент, феррит-гранатовая эпитаксиальная пленка.

MATHEMATICAL MODEL OF THE MAGNETOOPTICAL CONVERTER OF THE CURRENT

Urakseev Marat A., Sc.D. (Technics), Professor, Ufa State Aviation Technical University, 453000, Bashkortostan, Ufa, 12, K. Marx st., e-mail: uma1941@mail.ru.

Avdonina Nadejda A., Ph.D. (Technics), branch Ufa State Aviation Technical University in of Kumertau, 453000, Bashkortostan, Kumertau, 24, K. Marx st., e-mail: nadavd67@mail.ru.

The condition of polarization of a light wave on an exit of optical system under the influence of Faraday's effect where observable sizes are turn of the plane of polarization of linearly polarized radiation, its elliptichnost and change of its intensity when passing through a magnitoactive element (MAE) is defined. It is shown that for lack of an external magnetic field intensity of light radiation is determined by Malyus's law, and at influence of an external magnetic field the plane of polarization of linearly polarized light in MAE will turn in addition on a corner of faradeevsky rotation. The factors leading to losses of light by introduction of factor of g , considering reflection and absorption of light radiation in a polarizer and in MAE and factor of p considering not ideality of system a polarizer analyzer in crossed situation are established. Taking into account saturation ferrite – a garnet film influences of total density of energy of interaction of MAE with an external magnetic field are defined. The expression connecting intensity of a stream of light radiation of I on an exit of the magnetooptical converter of a current (MOPT) with intensity of an external magnetic field of H , enclosed to MAE, is received by parameters of a film and elements of optical system. For definition of the greatest influences of parameters on size of intensity of radiation the

СИСТЕМНЫЙ АНАЛИЗ И МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ

magneto-optical converter of an electric current is carried out the analysis of mathematical model. Dependences of intensity of a light stream on change of capacity of optical radiation at its passing through the air environment, optical system of the converter and a fiber light guide are defined. On the basis of the received schedules settlement dependences of intensity on MOPT exit from parameters optical systems are considered. Dependences of intensity of light radiation on electric and magnetic properties of a magnetoactive element of magneto-optical system are defined. On the basis of the analysis of the received dependences are drawn a conclusion on influence on intensity of light radiation of various parameters of a magnitoaktivny element when passing light via the magneto-optical converter of an electric current in a look ferrite – a garnet epitaksialny film.

Key words: Faradey's magneto-optical effect, rotation of the plane of the polarization, linearly polarized light, external magnetic field, polarization condition. magneto-optical converter of a current, Malyus's law, mathematical model, intensity of radiation, magnitoaktivny elemen., ferrite-garnet epitaksialny film.

Магнитные характеристики магнитооптического материала основаны на экспериментально установленной линейной [2, 3] связи с эффектом Фарадея. Наблюдаемыми величинами при этом являются поворот плоскости поляризации линейно поляризованного излучения, его эллиптичность и изменение его интенсивности при прохождении через магнитоактивный элемент (МАЭ).

Определим состояние поляризации световой волны на выходе оптической системы, в которой возникает эффект Фарадея под действием проекции вектора намагниченности M на направление распространения проходящего излучения (рис. 1).

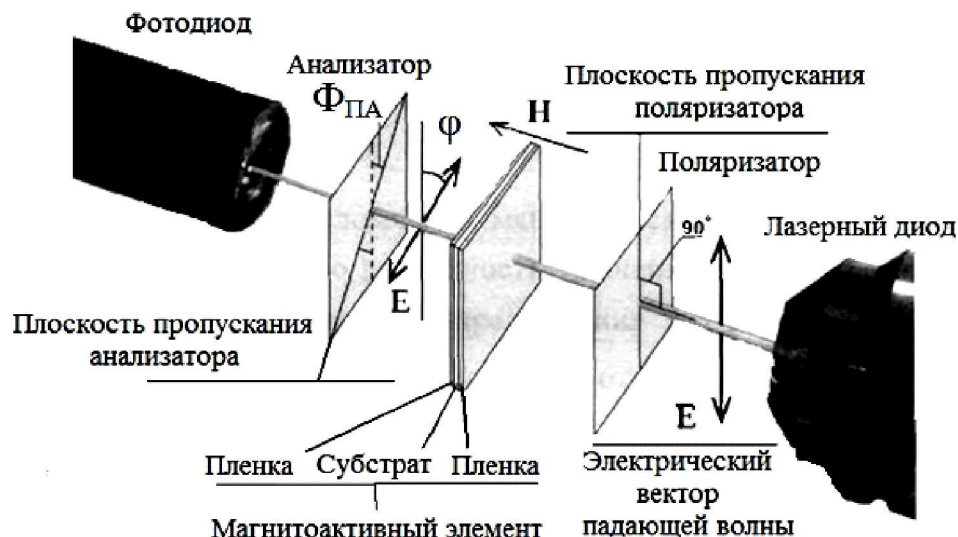


Рис. 1. Схема магнитооптического преобразователя магнитного поля на эффекте Фарадея

В отсутствие внешнего магнитного поля интенсивность светового излучения определяется по закону Малюса:

$$I = I_0 \cos^2 \Phi_{ПА} \quad (1),$$

где $\Phi_{ПА}$ – угол между осями пропускания поляризатора и анализатора; $I_0 = P_0/S_n$ – интенсивность излучения, падающего на поляризатор; P_0 – мощность излучения; S_n – площадь пятна света.

При воздействии внешнего магнитного поля плоскость поляризации линейно поляризованного света в МАЭ будет дополнительно поворачиваться на угол $\varphi_F h \cos \Theta_{ZY}$, где $\varphi_F = C_V H h$, тогда формула (1) принимает вид:

$$I = I_0 e^{-\alpha h} \left[1 - \sin^2 \left(\Phi_{ПА} + 2\varphi_F h \cos \Theta_{ZY} \right) \right] \quad (2),$$

где φ_F – удельное фарадеевское вращение; h – толщина феррит-гранатовой пленки.

При нормальном падении света на МАЭ формула (2) примет вид:

$$I = I_0 e^{-\alpha h} \cos^2 \left(\Phi_{ПА} + 2\varphi_F h \cos \Theta_M \right) \quad (3),$$

где Θ_M – угол отклонения вектора намагниченности M пленки от перпендикуляра к её поверхности.

В реальной оптической системе неизбежны потери света, поэтому в формулу (2) введем коэффициент g , учитывающий отражение и поглощение светового излучения в поляризаторе и в МАЭ; коэффициент p , учитывающий неидеальность системы поляризатор-анализатор в скрещенном положении. Тогда с учетом g и p выражение (2) примет вид:

$$I = g \cdot I_0 e^{-\alpha h} \left[p + (1-p) \cos^2 \left(\Phi_{ПА} + 2\varphi_F h \cos \Theta_M \right) \right] \quad (4).$$

В намагниченной до насыщения феррит-гранатовой пленке суммарную плотность энергии взаимодействия МАЭ с внешним магнитным полем можно описать выражением [1]:

$$w = w_H + w_{MC} + w_a \quad (5),$$

где плотность энергии Зеемана, плотность магнитостатической энергии и плотность энергии анизотропии соответственно (6), (7) и (8):

$$w_H = -\mu_0 (M, H) = -\mu_0 M_S (H_Z \cos \Theta_{ZY} + H_{\parallel} \sin \Theta_{ZY} \cos(\varphi_{XY} - \varphi_M)) \quad (6),$$

$$w_{MC} = -\frac{\mu_0 (M_S \cos \Theta)^2}{2} \quad (7),$$

$$w_a = K_{одн} \cos^2 \Theta \quad (8).$$

Подставив формулы (6) – (8) в выражение (5) и разделив обе части полученного выражения на $\mu_0 M_S$, получим

$$\frac{w}{\mu_0 M_S} = -H_Z \cos \Theta_{ZY} - H_{\parallel} \sin \Theta_{ZY} \cos(\varphi_{XY} - \varphi_M) - H_A \frac{\cos^2 \Theta_{ZY}}{2} \quad (9),$$

где $H_A = \frac{2K_u - \mu_0 M_S^2}{\mu_0 M_S}$ – характеристика поля магнитной анизотропии.

Разделив обе части выражения (9) на H_A , получим

$$\frac{w}{\mu_0 M_S H_A} = -a \cos \Theta_{ZY} - b \sin \Theta_{ZY} \cos(\varphi_{XY} - \varphi_M) - 0,5 \cos^2 \Theta_{ZY} \quad (10),$$

где $a = H_Z/H_A$ и $b = H_{\parallel}/H_A$ – нормализованные компоненты внешнего магнитного поля вне плоскости пленки и в плоскости пленки.

СИСТЕМНЫЙ АНАЛИЗ И МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ

Чаще всего внешнее магнитное поле направлено перпендикулярно поверхности МАЭ, тогда для минимума суммарной плотности энергии взаимодействия пленки МАЭ с внешним магнитным полем запишем:

$$\frac{\partial w}{\partial \Theta} = \alpha \sin \Theta - \sin \Theta \cos \Theta = 0 \quad (11).$$

Разделив обе части выражения (10) на $\sin \Theta$ и подставив полученное выражение в формулу (1) получим:

$$I = g I_0 e^{-\alpha h} \left[p + (1-p) \cos^2 \left(\Phi_{ПА} + 2\phi_F h \frac{H \mu_0 M_S}{2K_{одн} - \mu_0 M_S^2} \right) \right] \quad (112).$$

Полученное выражение связывает интенсивность потока светового излучения I на выходе магнитооптического преобразователя тока (МОПТ) с напряженностью внешнего магнитного поля H , приложенного к МАЭ, параметрами пленки и элементами оптической системы.

Поскольку удельное фарадеевское вращение $\varphi_F = VH$, а $H = \frac{i}{2\pi R}$, то выражение

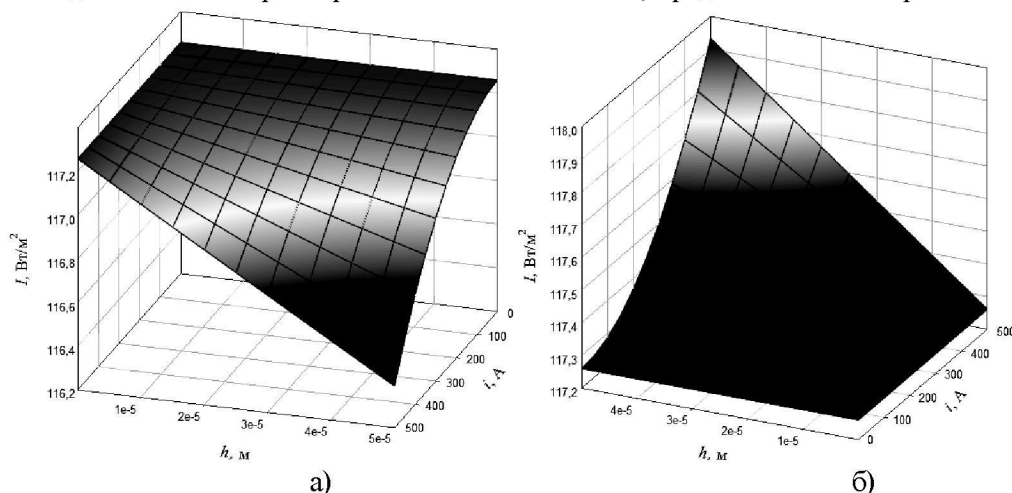
$$I = g \cdot I_0 \exp(-\alpha h) \left[p + (1-p) \cos^2 \left(\Phi_{ПА} + \frac{i^2 h V}{r^2} \frac{\mu_0 M_S}{2\pi^2 (2K_{одн} - \mu_0 M_S^2)} \right) \right] \quad (13)$$

может быть использовано для получения зависимости $I=f(i)$ в МОПТ.

Уравнение (13) является математической моделью МОПТ. Поэтому существует необходимость моделирования процесса, изменения мощности оптического излучения при его прохождении сквозь воздушную среду, оптическую систему преобразователя и волоконный световод.

Для определения наибольших влияний параметров на величину интенсивности излучения МОПТ, необходимо провести анализ математической модели.

На основании выражения (13) рассмотрим расчетные зависимости интенсивности на выходе МОПТ от параметров оптической системы, представленные на рис. 2–4.



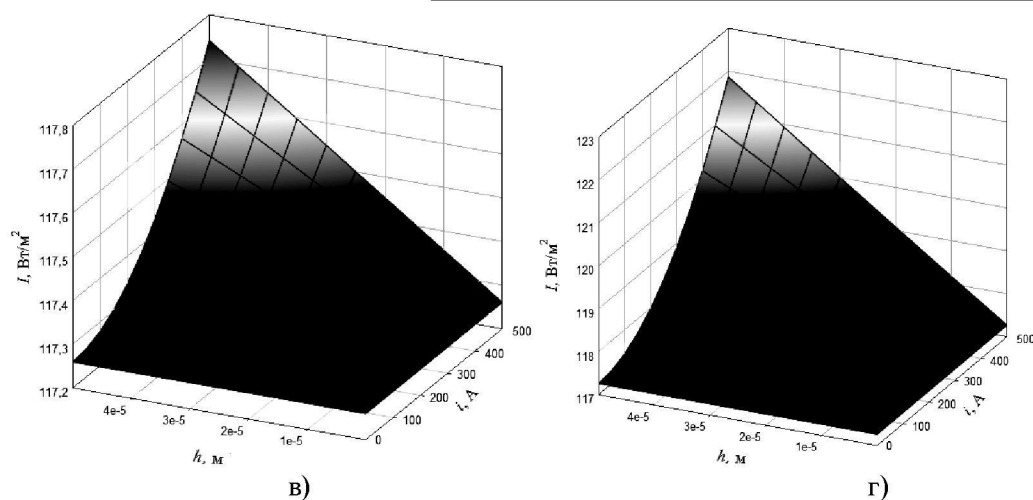


Рис. 2. Зависимость интенсивности излучения I на выходе чувствительного элемента МОПТ от измеряемого тока i при различных значениях толщины пленки МАЭ h и различных параметрах M_S :

а) $M_S = 20 \text{ кА/м}$; б) $M_S = 115 \text{ кА/м}$; в) $M_S = 150 \text{ кА/м}$; г) $M_S = 300 \text{ кА/м}$

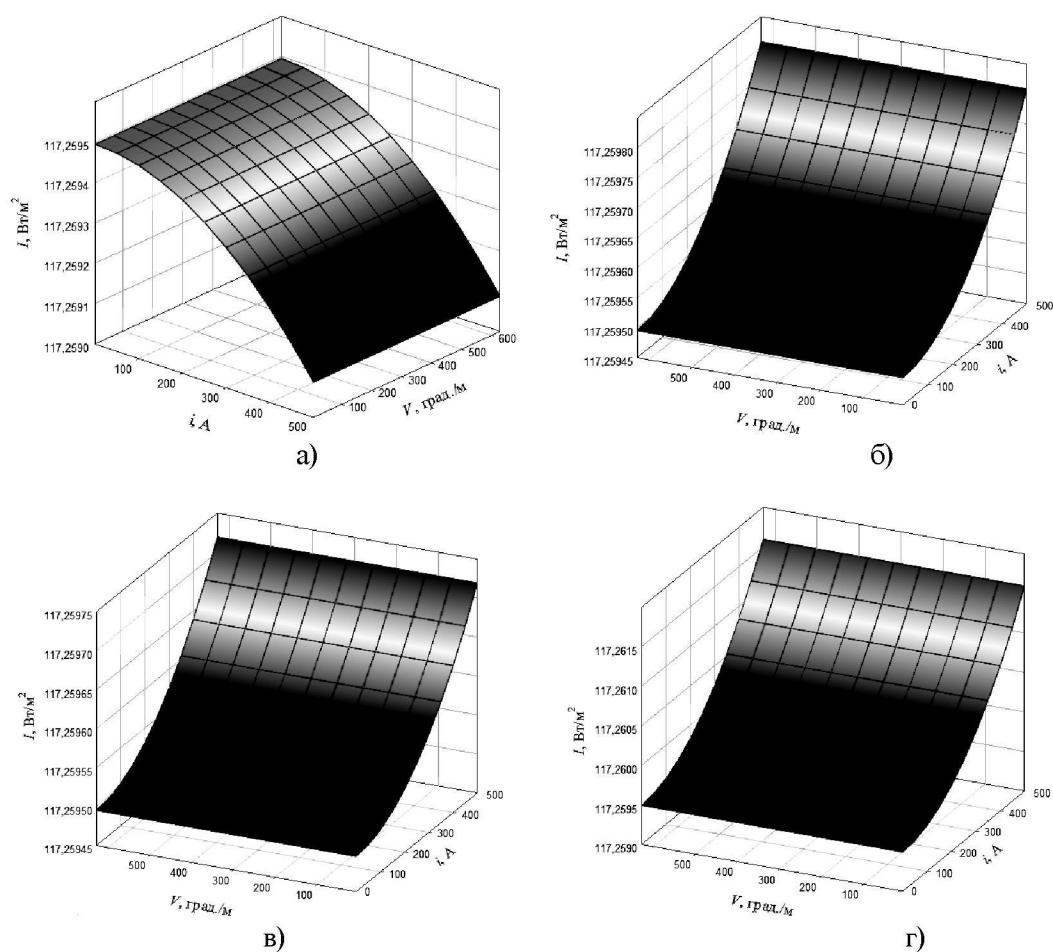


Рис. 3. Зависимость интенсивности излучения I на выходе чувствительного элемента МОПТ от измеряемого тока i при различных значениях постоянной Верде V и различных параметрах M_S :

а) $M_S = 20 \text{ кА/м}$; б) $M_S = 115 \text{ кА/м}$; в) $M_S = 150 \text{ кА/м}$; г) $M_S = 300 \text{ кА/м}$

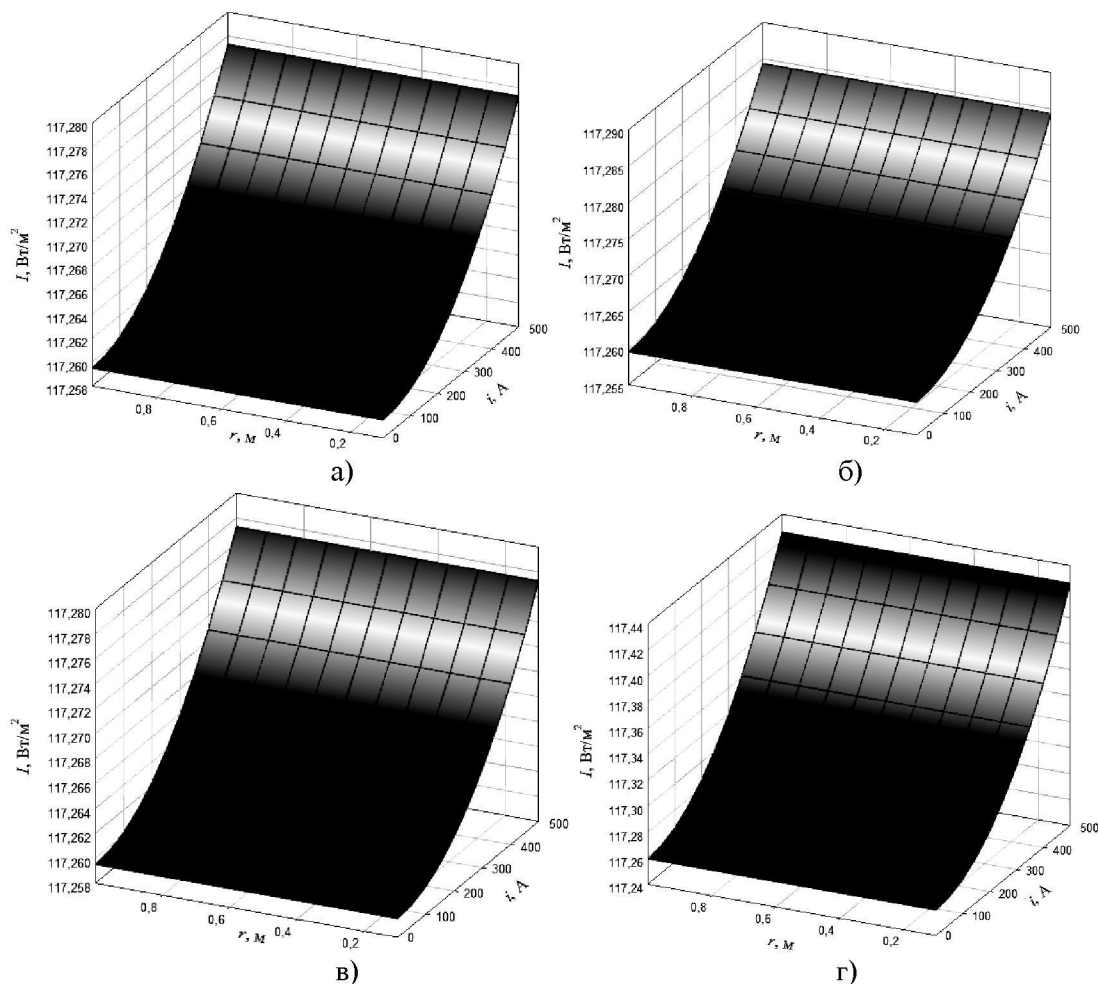


Рис. 4. Зависимость интенсивности излучения I на выходе чувствительного элемента МОПТ от измеряемого тока i при различных взаимных положениях проводника с током и МОПТ r и различных параметрах M_S :

а) $M_S = 20$ кА/м; б) $M_S = 115$ кА/м; в) $M_S = 150$ кА/м; г) $M_S = 300$ кА/м

На основе анализа полученных зависимостей можно сделать вывод о влиянии на интенсивность светового излучения различных параметров МАЭ при прохождении света через МОПТ [5, 6]. Магнитооптические материалы с низкими значениями намагниченности насыщения $M_S \approx 20$ кА/м уменьшают интенсивность светового излучения, максимум интенсивности – у материалов с высокими значениями M_S . На величину интенсивности светового излучения не влияет величина измеряемого тока и расстояние от проводника с током до МОПТ, что является неоспоримым достоинством данных МОПТ.

Список литературы

1. Носков М. М. Оптические и магнитооптические свойства металлов / М. М. Носков. – Свердловск : Изд-во УНЦ АН СССР, 1983.
2. Рандошкин В. В. Прикладная магнитооптика / В. В. Рандошкин, А. Я. Червоненкис. – М. : Энергоатомиздат, 1990.
3. Соколов А. В. Оптические свойства металлов / А. В. Соколов. – М. : Физматгиз, 1961.

4. Тикадзуми С. Физика ферромагнетизма : пер. с японск. / С. Тикадзуми. – М. : Мир, 1997. – Т. 1: Магнитные свойства вещества; Т. 2: Магнитные характеристики и практическое применение.
5. Ураксеев М. А. Математическая модель магнитооптического преобразователя для автоматизированных технологических процессов / М. А. Ураксеев, Н. А. Авдонина // Вестник УГАТУ. – 2009. – Т. 13, № 1 (31). – С. 36–38.
6. Ураксеев М. А. Проектирование магнитооптической измерительной системы / М. А. Ураксеев, Н. А. Авдонина // Приборы и системы: управление, контроль, диагностика. – 2010. – № 6. – С. 34–42.

References

1. Noskov M. M. Opticheskie i magnitnoopticheskie svojstva metallov / M. M. Noskov. – Sverdlovsk : Izd-vo UNC AN SSSR, 1983.
2. Randoshkin V. V. Prikladnaja magnitnooptika / V. V. Randoshkin, A. Ja. Chervonenkis. – M. : Jenergoatomizdat, 1990.
3. Sokolov A. V. Opticheskie svojstva metallov / A. V. Sokolov. – M. : Fizmatgiz, 1961.
4. Tikadzumi S. Fizika ferromagnetizma : per. s japonsk. / S. Tikadzumi. – M. : Mir, 1997. – Т. 1: Magnitnye svojstva vevestva; Т. 2: Magnitnye harakteristiki i prakticheskoe primenenie.
5. Urakseev M. A. Matematicheskaja model' magnitnoopticheskogo preobrazovatelja dlja avtomatizirovannyh tehnologicheskikh processov / M. A. Urakseev, N. A. Avdonina // Vestnik UGATU. – 2009. – Т. 13, № 1 (31). – S. 36–38.
6. Urakseev M. A. Proektirovanie magnitnoopticheskoy izmeritel'noj sistemy / M. A. Urakseev, N. A. Avdonina // Pribory i sistemy: upravlenie, kontrol', diagnostika. – 2010. – № 6. – S. 34–42.

УДК 681.51.011

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ АКУСТООПТИЧЕСКОГО ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ ЛИНЕЙНЫХ ПЕРЕМЕЩЕНИЙ

Ураксеев Марат Абдуллович, доктор технических наук, профессор, Уфимский государственный авиационный технический университет, 453000, Республика Башкортостан, г. Уфа, ул. К. Маркса, 12, e-mail: uta1941@mail.ru.

Пахомов Александр Николаевич, аспирант, Уфимская государственная академия экономики и сервиса, 450078, Республика Башкортостан, г. Уфа, ул. Чернышевского, 145, e-mail: Allexx2010@mail.ru.

Приведена математическая модель, учитывающая модуляцию по фазе одночастотного когерентного излучения на выходе модулятора. При ее построении учитывалось, что наиболее используемыми модами на выходе модулятора являются моды порядка 0; ± 1 . Установлены зависимости интенсивности светового потока этих мод 0; ± 1 порядка от интенсивности источника оптического излучения в виде лазера или лазерного диода, длины ультразвуковой волны, создаваемой пьезоизлучателем, питаемым генератором радиочастоты.

Приведен анализ акустооптического преобразователя перемещений, действие которого основано на акустооптической дифракции Рамана-Ната. Приведено описание дифракционного спектра 0; ± 1 -го порядков акустооптического преобразователя частоты излучения. Описано математически преобразование одночастотного лазерного излучения с помощью акустооптического преобразователя, основанное на явлении дифракции света на ультразвуковых волнах. Дифракция когерентного излучения на ультразвуке обеспечивает получение на выходе акустооптического модулятора когерентных составляющих излучения со сдвигом частоты. Приведена формула отклонения углов между интенсивностями светового потока 0; ± 1 порядка и горизонтальной осью.