

ISSN 2520-6915



ВЕСТНИК

ФИЗИКО-ТЕХНИЧЕСКОГО ИНСТИТУТА
КРЫМСКОГО ФЕДЕРАЛЬНОГО УНИВЕРСИТЕТА
имени В.И. ВЕРНАДСКОГО

Том 1 (67-69)

№ 4
2017

ВЕСТНИК
ФИЗИКО-ТЕХНИЧЕСКОГО ИНСТИТУТА
КРЫМСКОГО ФЕДЕРАЛЬНОГО
УНИВЕРСИТЕТА имени В. И. ВЕРНАДСКОГО

Том 1 (67–69), № 4

Крымский федеральный университет имени В. И. Вернадского
Симферополь
2017

Редакционная коллегия журнала

<i>Бержанский В. Н.</i> , д-р физ.-мат. наук, проф., главный редактор	<i>Дзедолик И. В.</i> , д-р физ.-мат. наук, проф.
<i>Глумова М. В.</i> , канд. физ.-мат. наук, доц., заместитель главного редактора	<i>Милюков В. В.</i> , канд. техн. наук, доц.
<i>Михайлова Т. В.</i> , канд. физ.-мат. наук, ответственный секретарь	<i>Полулях С. Н.</i> , д-р физ.-мат. наук, доц.
<i>Алексеев К. Н.</i> , д-р физ.-мат. наук, проф.	<i>Стругацкий М. Б.</i> , д-р физ.-мат. наук, проф.
<i>Бекиров Э. А.</i> , д-р техн. наук, проф.	<i>Сосновский Ю. В.</i> , канд. техн. наук, доц.
<i>Воляр А. В.</i> , д-р физ.-мат. наук, проф.	<i>Старостенко В. В.</i> , д-р физ.-мат. наук, проф.
<i>Григорьев П. Е.</i> , д-р биол. наук, проф.	<i>Фридман Ю. А.</i> , д-р физ.-мат. наук, проф.
	<i>Шапошников А. Н.</i> , канд. физ.-мат. наук, ст. науч. сотр.
	<i>Яценко А. В.</i> , д-р физ.-мат. наук, проф.

Научное периодическое издание, журнал
**Вестник Физико-технического института Крымского федерального
университета имени В. И. Вернадского**
Том 1 (67–69), № 4

Историческим предшественником журнала «Вестник Физико-технического института Крымского федерального университета имени В. И. Вернадского» является научный журнал «Ученые записки Таврического национального университета имени В. И. Вернадского. Серия: Физико-математические науки». Журнал был основан в 1918 г. как «Известия Таврического университета». За прошедшее столетие название журнала менялось несколько раз в связи с преобразованиями университета

Печатается по решению Научно-технического совета Крымского федерального университета имени В. И. Вернадского, протокол № 3 от «03» октября 2018 г.

Адрес редакции: 295007, Республика Крым, г. Симферополь,
пр-т Академика Вернадского, д. 4
E-mail: journal.phys.tech@cfuv.ru
Web-site: <http://jphystech.cfuv.ru/>
Тел.: +7 (3652) 51-70-95

JOURNAL
OF PHYSICS AND TECHNOLOGY INSTITUTE
OF V. I. VERNADSKY CRIMEAN
FEDERAL UNIVERSITY

Volume 1 (67–69), No. 4

V. I. Vernadsky Crimean Federal University
Simferopol
2017

Journal Editorial Board

V. N. Berzhansky, Dr. of Sc. (Phys. & Math.), Prof.,

Editor-in-Chief

M. V. Glumova, Ph.D. (Phys. & Math.), Ass. Prof.,

Deputy Editor-in-Chief

T. V. Mikhailova, Ph.D. (Phys. & Math.), **Assistant**

Editor

C. N. Alexeyev, Dr. of Sc. (Phys. & Math.), Prof.

E. A. Bekirov, Dr. of Sc. (Technical Sc.), Prof.

A. V. Volyar, Dr. of Sc. (Phys. & Math.), Prof.

P. E. Grigoriev, Dr. of Sc. (Biology), Prof.

I. V. Dzedolik, Dr. of Sc. (Phys. & Math.), Prof.

V. V. Milyukov, Ph.D. (Technical Sc.), Ass. Prof.

S. N. Polulyakh, Dr. of Sc. (Phys. & Math.), Ass. Prof.

M. B. Strugatsky, Dr. of Sc. (Phys. & Math.), Prof.

Yu. V. Sosnovsky, Ph.D. (Technical Sc.), Ass. Prof.

V. V. Starostenko, Dr. of Sc. (Phys. & Math.), Prof.

Yu. A. Fridman, Dr. of Sc. (Phys. & Math.), Prof.

A. N. Shaposhnikov, Ph.D. (Phys. & Math.), Senior
Researcher Degree

A. V. Yatsenko, Dr. of Sc. (Phys. & Math.), Prof.

Scientific periodical, journal

**Journal of Physics and Technology Institute
of V. I. Vernadsky Crimean Federal University
Volume 1 (67–69), No. 4**

The historical predecessor of journal “Journal of Physics and Technology Institute of V. I. Vernadsky Crimean Federal University” is scientific journal “Scientific Notes of Taurida National V. I. Vernadsky University. Series: Physics and Mathematics Sciences”. The journal was founded in 1918 as “Annales de l’Universite de Tauride”. Over the past century, the journal title has changed several times due to the university reforms

**Published by the decision of Scientific and Technical Council of V. I. Vernadsky
Crimean Federal University, protocol No. 3 issued 03 October 2018**

Address of Editorial Board: 295007, Republic of Crimea, Simferopol,
4 Vernadskogo Prospekt

E-mail: journal.phys.tech@cfuv.ru

Web-site: <http://jphystech.cfuv.ru/>

Phone.: +7 (3652) 51-70-95

ФИЗИКА И МАТЕМАТИКА

PHYSICS AND MATHEMATICS

*Вестник Физико-технического института
Крымского федерального университета имени В. И. Вернадского
Том 1 (67–69). № 4. 2017. С. 5–24
Journal of Physics and Technology Institute of V. I. Vernadsky Crimean Federal University
Volume 1 (67–69). No. 4. 2017. P. 5–24*

УДК 537.632

МАГНИТОПЛАЗМОННЫЕ СТРУКТУРЫ (ОБЗОР). ЧАСТЬ 1

Басиладзе Г. Д., Бержанский В. Н., Недвига А. С. , Шапошников А. Н.*

*Физико-технический институт, Крымский федеральный университет имени
В. И. Вернадского, Симферополь 295007, Россия
E-mail: nedviga@list.ru

В работе представлен перспективный класс наноструктур с объединенными магнитными и плазмонными функциональными возможностями – магнитоплазмонные наноструктуры. Реализация подобных наноструктур осуществляется с использованием слоев ферромагнитных металлов или магнетодиэлектриков. Магнитная активность наноструктур позволяет управлять их плазмонными свойствами с помощью внешнего магнитного поля, изменяя спектральное положение резонанса, что позволяет создавать активные плазмонные устройства для систем управления оптическими сигналами и магнитооптических сенсоров.

Ключевые слова: плазмонный резонанс, магнитоплазмоника, плёнка граната, магнитофотонный кристалл, плазмонная наноструктура.

PACS: 42.70.Qs, 71.36.+c, 78.20.Ls, 78.66.–w, 78.67.–n, 85.70.Sq.

ВВЕДЕНИЕ

Несмотря на успехи в разработке материалов для прикладной магнитооптики сегодня продолжают поиски методов усиления магнитооптических (МО) эффектов. Так как потенциал методов, основанных исключительно на синтезе материалов, почти исчерпан, наноструктурирование признано очень перспективным для усовершенствования оптических свойств материалов [1]. Этот подход отражает новую парадигму современной оптики, в которой оптические свойства в основном определяются геометрическими резонансами, а не электронными. Примером плодотворной МО реализации этого подхода является магнитофотонный кристалл, обеспечивающий значительное усиление эффекта Фарадея [2-4].

Существование самоподдерживаемых коллективных возбуждений электронной плазмы и электромагнитного поля, локализованного на границах металл/диэлектрик, предсказано Ричи в 50-х годах прошлого века [5]. Экспериментальное доказательство работы Ричи вскоре последовало в экспериментах по потере энергии электронов, после чего термин «поверхностный плазмон-поляритон» (ППП) был введён в научный оборот, чтобы назвать кванты этих коллективных колебаний [6]. С тех пор наблюдается значительный прогресс в исследованиях ППП, сыгравших ключевую роль во многих проблемах конденсированного вещества и физики поверхности.

Растущий интерес к плазмонным наноструктурам и наночастицам сопровождается большим количеством работ в этой области, в том числе

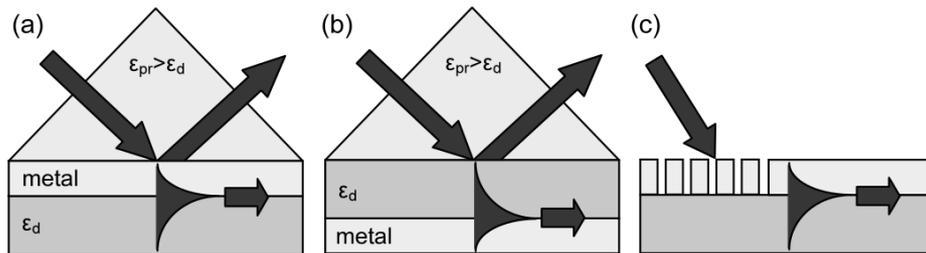
посвященных магнитоплазмонике, исследующей резонансы МО эффектов, имеющих плазмонную природу.

В свете вышеизложенного, тесный союз плазмоники и магнитооптики выглядит взаимовыгодным и перспективным [7]. С одной стороны, магнитное поле является хорошим инструментом для управления ППП, с другой стороны, ППП могут использоваться для усиления МО эффектов.

В обзоре рассмотрены одномерные магнитоплазмонные структуры, содержащие, в основном, МО эпитаксиальные пленки ферритов-гранатов (ЭПФГ) и поликристаллические пленки ферритов-гранатов, полученные методами вакуумного напыления, а также двумерные магнитоплазмонные структуры и текущее состояние разработок в этой области.

1. ОСНОВНЫЕ МЕТОДЫ ВОЗБУЖДЕНИЯ ПОВЕРХНОСТНЫХ ПЛАЗМОН-ПОЛЯРИТОНОВ

Важно знать, что волновой вектор свободной электромагнитной волны внутри диэлектрика меньше, чем волновой вектор ППП на границе металл/диэлектрик. Вследствие этого резонансная связь света с ППП не реализуется. Поэтому для возбуждения ППП были разработаны специальные экспериментальные схемы. Фотоны и ППП-волновые векторы могут быть согласованы либо туннелированием фотонов в геометрии полного отражения (конфигурации или геометрии Кретчмана и Отто), либо решёточным методом с использованием дифракционных эффектов на периодической одно- или двумерной структуре (рис. 1) [8].



а – геометрия Кретчмана, б – геометрия Отто, с – решеточный метод

Рис. 1. Основные методы возбуждения ППП, применяемые на практике

В геометрии Кретчмана (рис. 1 а) металлическая пленка освещается через диэлектрическую призму под углом θ больше критического угла полного внутреннего отражения [9, 10]. При этом происходит резонансное туннелирование света через металлическую пленку и возбуждение ППП на внешней по отношению к призме стороне металлической пленки, а в спектре отражения наблюдается резкий минимум, что указывает на эффективное взаимодействие света с ППП, а вблизи границы раздела металл/диэлектрик наблюдается значительная концентрация электромагнитной энергии, плотность которой более чем на два порядка превышает плотность энергии в падающем пучке света. Метод возбуждения ППП в геометрии

Кретчмана применим для случая не очень толстых пленок ($h_m < 80$ нм). Для более толстых пленок эффективность этого метода очень мала, и необходимо использовать иные подходы, например, метод возбуждения ППП в геометрии Отто.

В геометрии Отто ППП можно возбуждать на ближней по отношению к призме стороне металлической пленки (рис. 1 b). Призма, где происходит полное внутреннее отражение, расположена вблизи поверхности металла и туннелирование фотонов происходит через воздушный зазор между призмой и поверхностью [11].

Возбуждение ППП может осуществляться также с использованием дифракционных эффектов. Это может быть реализовано, если либо металл, либо диэлектрик периодически перфорирован системой щелей или отверстий. Свет, дифрагировавший на таких решетках, может иметь различные компоненты волнового вектора вдоль поверхности металла. Если некоторые из них совпадают с волновым вектором ППП, то существенная доля энергии данного дифракционного порядка идет на возбуждение ППП (рис. 1 c). В конфигурации решетки ППП могут возбуждаться на обеих поверхностях металлической пленки [8].

1.1. Примеры практической реализации геометрии Кретчмана

В работе [12] рассмотрена практическая реализация конфигурации Кретчмана применительно к ЭПФГ с плазмонной пленкой из золота (рис. 2).

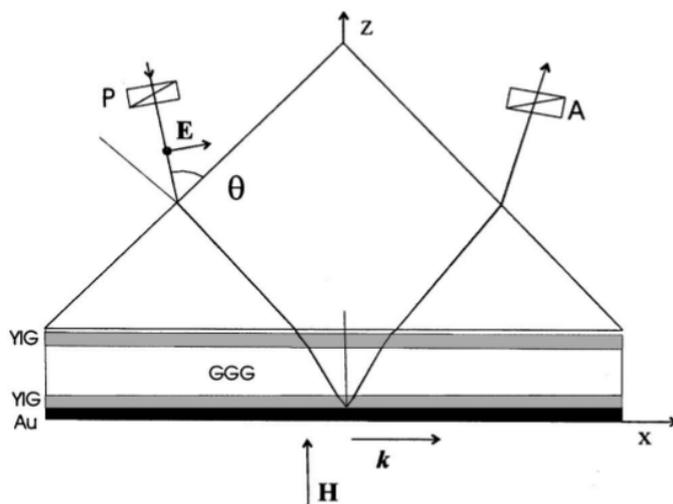
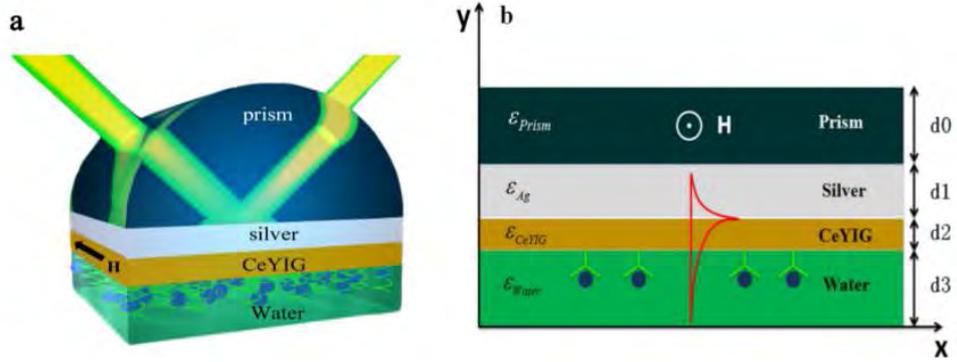


Рис. 2. Использование геометрии Кретчмана для изучения МО свойств пленок Vi:YIG

Авторы [12] использовали пленки $\text{Vi}_{1,8}\text{Y}_{1,2}\text{Fe}_5\text{O}_{12}$ толщиной 2,5 мкм с легкой осью намагниченности, перпендикулярной поверхности. Пленки выращивали методом жидкофазной эпитаксии на обеих сторонах подложки из гадолиний-галлиевого граната толщиной 0,4 мм. Поле насыщения в направлении, перпендикулярном пленке, было 150 Гс. Угол поворота Фарадея, измеренный в геометрии пропускания образца, составлял 2,0 и 0,22 °/мкм на длинах волн 633 и 1310 нм, соответственно.

Пленка из золота толщиной 41 нм, была нанесена на одну из сторон образца термическим испарением; свободная сторона образца контактировала со стеклянной призмой. Призма с образцом располагалась на вращающемся столике. Поверхностный плазмонный резонанс (ППР) исследовали при намагничивании образца перпендикулярно плоскости пленки.

Один из вариантов практической реализации геометрии Кретчмана с использованием пленки феррита-граната, представлен в работе [13] (см. рис. 3 а).



Толщина слоя d_2 (Ce:YIG) составляет 25 нм, толщина слоя d_1 (Ag) составляет 41 нм (условие максимального фактора качества)

Рис. 3. МО ППР датчик (а) и его поперечное сечение (b)

Датчик на основе МО элемента и структуры для возбуждения ППР (МО ППР датчик) изготовлен с использованием диэлектрической МО пленки $\text{Ce}_1\text{Y}_2\text{Fe}_5\text{O}_{12}$ (Ce:YIG) и металлической пленки Ag. На рис. 3 а показана предлагаемая схема МО ППР датчика. На рис. 3 б – вид поперечного сечения устройства с обозначением диэлектрических проницаемостей слоев, их толщин и направления магнитного поля H . Преобразователь датчика состоит из подложки, тонкого слоя Ag (41 нм) и слоя Ce:YIG (25 нм). Чувствительный интерфейс находится между пленкой Ce:YIG и зондируемой средой. Стеклянная призма используется для согласования волновых векторов падающего света и ППР на интерфейсе Ag/Ce:YIG.

Благодаря низким оптическим потерям Ag и сильному МО эффекту Ce:YIG ($\theta_F = 2 \cdot 10^4$ °/см на $\lambda = 1000$ нм), достигается высокое значение МО добротности и чувствительности. Устройство превосходит по этим показателям МО ППР датчики на основе ферромагнитного металла на той же длине волны. Это достигается, в том числе, за счет высокого показателя преломления пленок Ce:YIG ($n = 2,3$ на $\lambda = 1100$ нм) по сравнению с анализируемой средой. При помощи аналитического и численного моделирования была создана оптимизированная структура МО ППР датчика на основе Ag/Ce:YIG, максимальная чувствительность к показателю преломления которого достигается при длине волны света 1160 нм и толщине Ce:YIG и слоя серебра 25 и 41 нм, соответственно. Прилагаемое при этом поле H для магнитного насыщения пленки Ce:YIG в плоскости достигало 500 Э. Чувствительность датчика количественно характеризуется МО добротностью FoM

$$FoM = \frac{d|R(+H) - R(-H)|}{d\theta} \times \frac{d\theta}{dn} = \frac{d\Delta R}{dn}, \quad (1)$$

где R – коэффициент отражения света; H – внешнее магнитное поле; θ – угол падения для резонансного возбуждения ППП; n – показатель преломления исследуемой среды.

1.2. Пример использования геометрии Отто для целей сенсорики

В работе [14] представлена теоретическая модель структуры (подложка из стекла BK-7/Au/Fe/Au) с призмным возбуждением ППП в геометрии Отто (рис. 4).

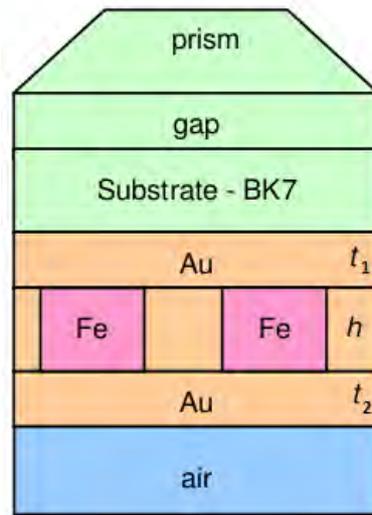


Рис. 4. МО структура ППП в геометрии Отто

Исследованы параметры отражения и эффект Керра структуры при разных периодах решетки из цилиндрических микроточек Fe и толщинах пленок золота. Высота и радиус цилиндрических микроточек Fe в матрице Au – 20 нм и 1 мкм, соответственно. Толщина металлической подструктуры $t_1 + h + t_2 = 40$ нм, где h – высота цилиндрической микроточки (табл. 1).

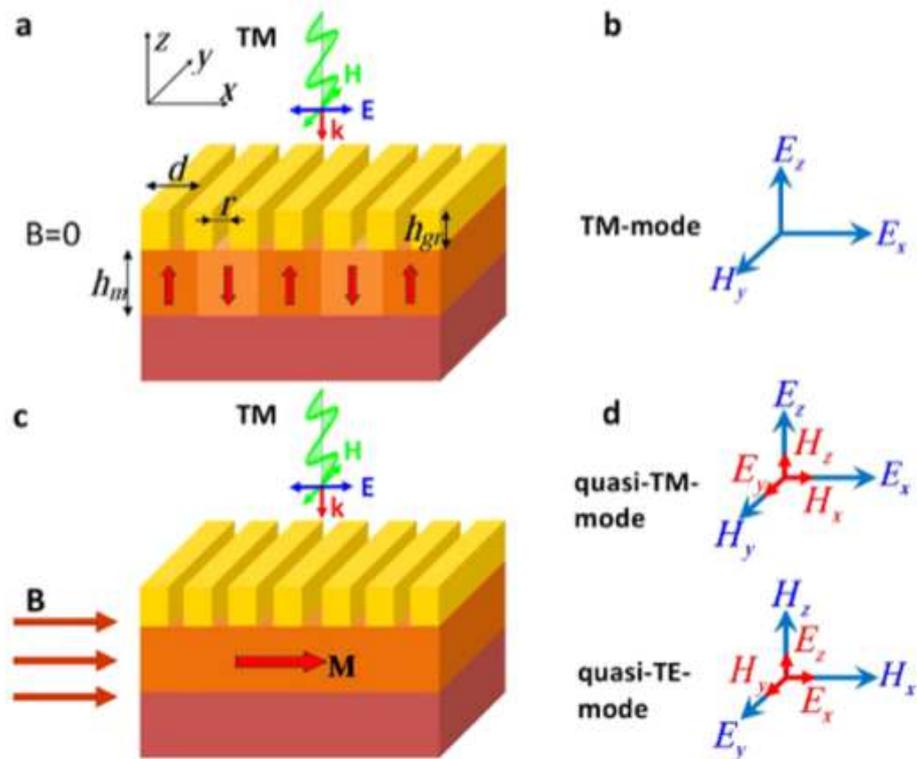
Таблица 1. Толщина слоёв в Au/Fe/Au наноструктуре

Variant	t_1	h	t_2
A	0	20	20
B	10	20	10
C	15	20	5
D	5	30	5
E	15	10	15

В зависимости от угла падения р-поляризованного света с длиной волны 632,8 нм коэффициент отражения может достигать 85 %. Влияние МО активности решетки Fe было изучено посредством меридионального эффекта Керра. Максимальный поворот плоскости колебаний света достигает $4 \cdot 10^{-3}$ град, предельное значение эллиптичности – около $3 \cdot 10^{-3}$ град. Наблюдается также влияние толщины пленки Au на параметры эффекта Керра. Полученные результаты показывают перспективность исследованной структуры для создания МО ППР чувствительных элементов для анализа исследуемых сред.

1.3. Использование дифракционных эффектов для возбуждения поверхностных плазмон-поляритонов

В работе [15] представлены схема и режимы работы магнитоплазмонного кристалла (МПК) в размагниченном (многодоменном) и намагниченном в продольном направлении состояниях (рис. 5).

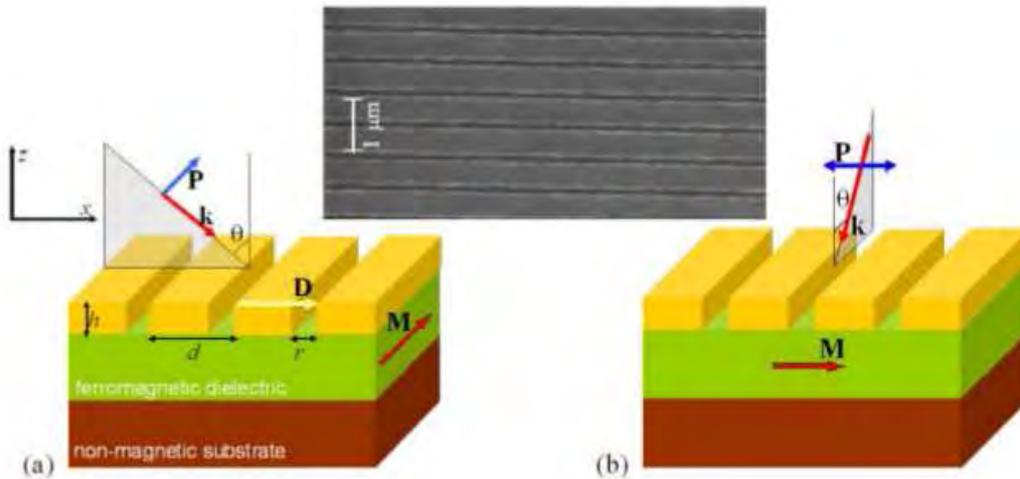


а, с – МПК в размагниченном (многодоменном) и намагниченном в продольном направлении (монодоменном) состояниях, соответственно; b, d – электромагнитные моды МПК, соответственно

Рис. 5. Схемы магнитоплазмонных кристаллов

МПК состоит из золотой решетки высотой h_{gr} и ферромагнитного диэлектрика толщиной h_m , выращенного на немагнитной подложке. Золотая решетка имеет период d и ширину щели r . Оптические моды возбуждаются падающим ТМ-поляризованным светом. Длинные стрелки представляют основные компоненты поля, связанные с режимами ТМ и ТЕ в немагнитном состоянии, а короткие – компоненты, вызванные продольной намагниченностью.

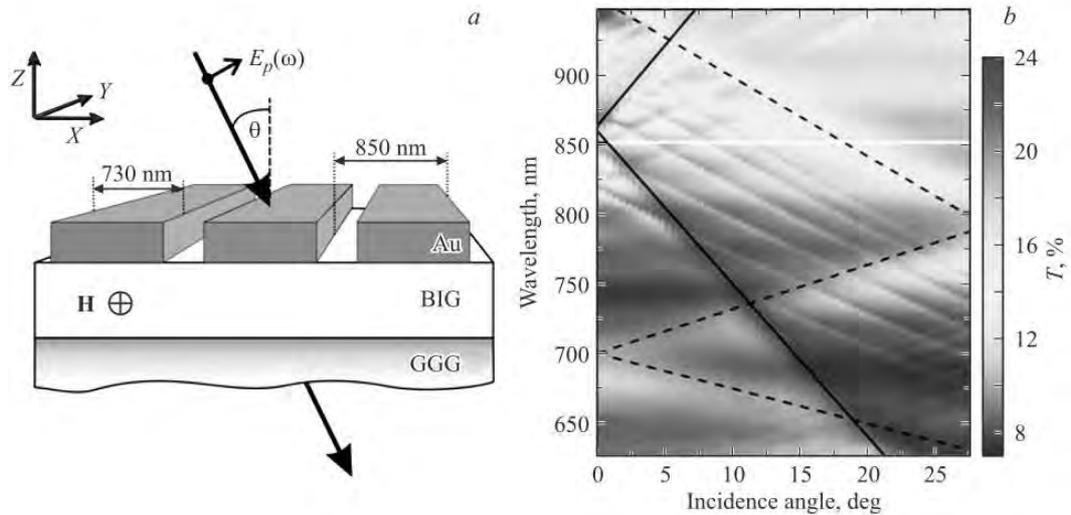
В работе [16] представлена сходная с предыдущей геометрия расположения периодической решетки из золота на поверхности магнитного диэлектрика (пленки висмут-замещенного феррита-граната, выращенной на подложке из гадолиний галлиевого граната относительно ориентации плоскостной намагниченности этого слоя (рис. 6). Параметры слоя перфорированного золота $d = 594$ нм, $r = 110$ нм и $h = 120$ нм.



ориентация намагниченности **M**: а – параллельно щелям, б – перпендикулярно щелям; вставка: РЭМ-изображение перфорированной структуры золота

Рис. 6. Магнитоплазменная гетероструктура

Подобная магнитоплазменная структура также приведена в [17]. В этой работе были исследованы линейные и нелинейные оптические эффекты. Схематическое изображение МПК, геометрии эксперимента и спектр пропускания структуры приведены на рис. 7.



области возбуждения ППП на границах раздела воздух/золото – сплошные линии,
на границах раздела золото/гранат – штриховые линии

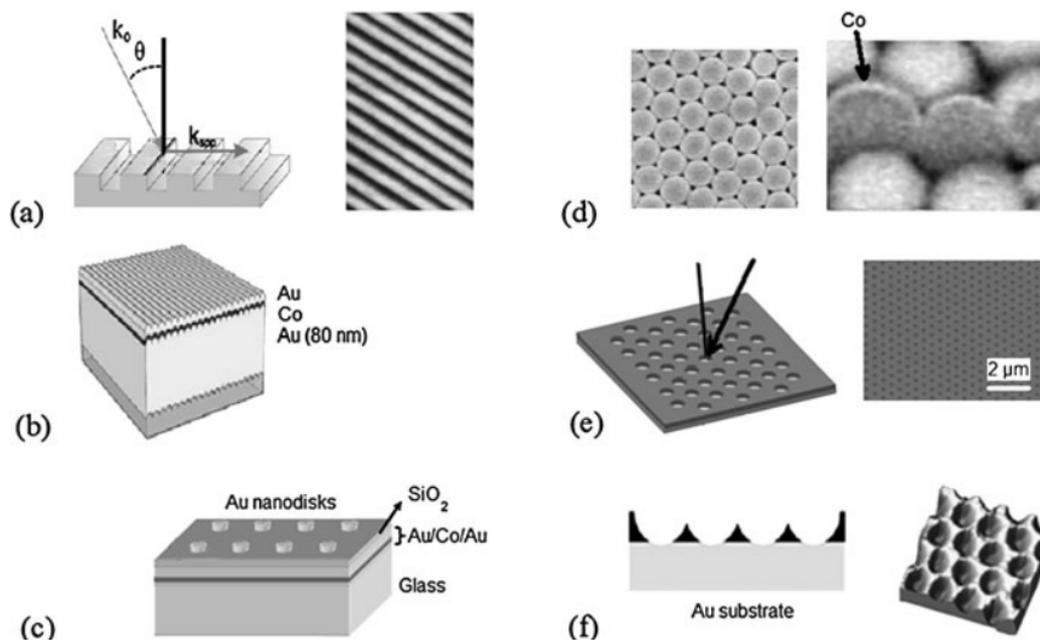
Рис. 7. Схематическое изображение структуры МПК (а), спектры пропускания МПК в зависимости от длины волны и угла падения света (б)

2. НЕКОТОРЫЕ РАЗНОВИДНОСТИ ПЛАЗМОННЫХ НАНОСТРУКТУР

2.1. Системы со структурированными металлическими магнитными компонентами

Определенный интерес представляют полученные в [18-23] образцы плазмонных кристаллов, в которых используется периодичность металлического ферромагнетика для возбуждения плазмонных мод. МО эффекты в них усиливаются в значительно большей степени, чем в случае структур с гладкими функциональными слоями. На рис. 8 (а, b, d, f) приведены изображения этих структур, полученные с помощью атомно-силового микроскопа (АСМ) и растрового электронного микроскопа (РЭМ).

На рис. 8 а [18] и 8 б [19] показаны плазмонные структуры в виде дифракционных решеток, где наблюдали усиление МО активности, вызванное возбуждением ППП. В работе [18] исследовалась 1D решетка из слоя никеля, толщиной 100 нм, нанесенного на полимерную решетку с глубиной штрихов около 50 нм, и периодом $\lambda/2$ (рис. 8 а). При использовании оптических частот для возбуждения плазмонного резонанса в геометрии рис. 8 а длина пробега ППП была сопоставима с периодом решетки. Взаимодействие ППП с решеткой при такой длине пробега приводило к усилению экваториального эффекта Керра (ЭЭК) почти на порядок по сравнению со случаем гладких ферромагнитных пленок. Подобный эффект наблюдали также в структуре, представляющей собой дифракционную решетку, выполненную в виде гофрированного трехслойного покрытия Au/Co/Au на поликарбонатной решетке (рис. 8 б [19]).



а – 1D-решетка никеля (справа – изображение АСМ) [18]; б – трёхслойная Au/Co/Au-решетка на поликарбонатной решетке [19]; с – золотые нанодиски на трехслойном Au/Co/Au [20]; д – двумерная наногофрированная пленка кобальта на наружной поверхности коллоидного кристалла полиметилметакрилата (слева – РЭМ-изображение, справа – микрофотография сечения частиц, выполненная фокусированным пучком ионов Ga, покрытие Co видно, как яркий слой) [21]; е – 2D-плазмонный кристалл кобальта (справа – РЭМ-изображение) [22]; ф – 2D-плазмонный кристалл из самоорганизованных полимерных монослоев, реплицированных в никеле на золотой подложке (справа – изображение АСМ) [23]

Рис. 8. Различные типы плазмонных кристаллов с магнитными компонентами

В [20] (рис. 8 с) было изучено влияние МО активности трёхслойной структуры Au/Co/Au (16 нм/10 нм/6 нм) на возбуждение локализованных плазмонных резонансов массива наноразмерных золотых дисков диаметром 110 нм, высотой 20 нм (периодичность массива варьировалась от 250 до 400 нм), нанесенных на поверхность диэлектрической прослойки SiO₂ толщиной 20, 50 или 80 нм. Изменение толщины диэлектрической прослойки позволяет контролировать связь между МО и плазмонными компонентами, в то время как плотность нанодисков позволяет контролировать поглощаемый системой свет через локализованное возбуждение плазмона.

Было показано, что эффект массива нанодисков двоякий. Во-первых, он оптимизирует поглощение света при определенных энергиях фотонов, соответствующих локализованному поверхностному плазмонному возбуждению

массива, изменяя отражательную способность системы (этот эффект определяется как чисто оптический вклад). Во-вторых, при локализованном резонансе плазмона электромагнитное поле во всей системе перераспределяется, а усиленная МО активность происходит при увеличении электромагнитного поля в магнитном слое (этот эффект определяется как чисто МО вклад массива нанодисков). Усиление ЭЭК при возбуждении ППП происходит из-за смещения плазмонного резонанса в поперечном магнитном поле. Такое смещение имеет место только для распространяющихся (т.е. не локализованных) ППП. Магнитное поле слабо влияет на положение резонансных частот локализованных плазмонов. Как следствие, при возбуждении локализованных плазмонов усиление ЭЭК не наблюдается. Тем не менее, взаимодействие локализованных и распространяющихся поверхностных плазмонных мод приводит к изменению дисперсионной характеристики ППП и, как следствие, к изменению сигнала при ЭЭК [20] (рис. 8 с).

Большинство описанных выше периодических структур изготавливались методами электронно-лучевой литографии и последующего травления. Но существуют и другие способы изготовления плазмонных кристаллов. Например, авторы [21] изготовили двумерную плазмонную структуру путем напыления Co или Ni на поверхность коллоидного кристалла из полиметилметакрилата (ПММА) (рис. 8 d). Ими установлено, что существуют резонансные особенности в спектрах керровского вращения. Они связаны с возбуждением ППП и резонансами, соответствующими многократному отражению и интерференции света от подложки из коллоидного кристалла и наноструктурированной пленки.

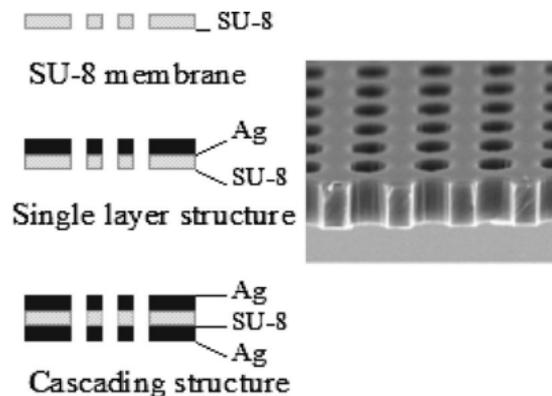
Двумерные плазмонные кристаллы на основе перфорированной пленки из кобальта рассматривались в [22] (рис. 8 e). Были исследованы различные сетки с диаметром отверстий в диапазоне от 220 до 330 нм, в то время как расстояние между отверстиями поддерживалось постоянным и равнялось 470 нм. Продемонстрировано, что двумерная гексагональная система субволновых отверстий оказывает влияние не только на МО эффект Керра, но также и на магнитные свойства структуры. Это выражается в увеличении коэрцитивного поля в плоскости намагниченности при увеличении диаметра отверстий и появлении компоненты намагниченности, лежащей вне плоскости пленки.

На рис. 8 f, приведенном в [23] представлен плазмонный кристалл из никеля на золотой подложке, изготовленный с использованием монослоя полистирольных сфер диаметром 320, 457 и 780 нм, расположенных на подложке, в качестве шаблона. Структурированный слой никеля наносился на подложку методом электрохимического осаждения. Авторы сообщили об увеличении полярного и экваториального эффектов Керра при возбуждении в никеле ППП. Однако было показано, что разупорядоченность в структуре уменьшает величину этих эффектов.

2.2. Каскадные структуры магнитоплазмонных кристаллов

В работе [24] было показано, что трехслойная система, содержащая две субволновые серебряные решетки (рис. 9) общей толщиной 100 нм, разделенные диэлектрическим слоем из фоторезиста SU-8, позволяет увеличить коэффициент пропускания по сравнению с одной дифракционной решеткой толщиной 50 нм,

обладающей эффектом экстраординарного пропускания. Максимальное пропускание такой каскадной металлической структуры, которое зависит от расстояния между двумя металлическими пленками (2,2; 2,9; 3,2; 4,5 и 5,4 мкм), может быть более чем на 400 % больше, чем у соответствующей одиночной металлической структуры.



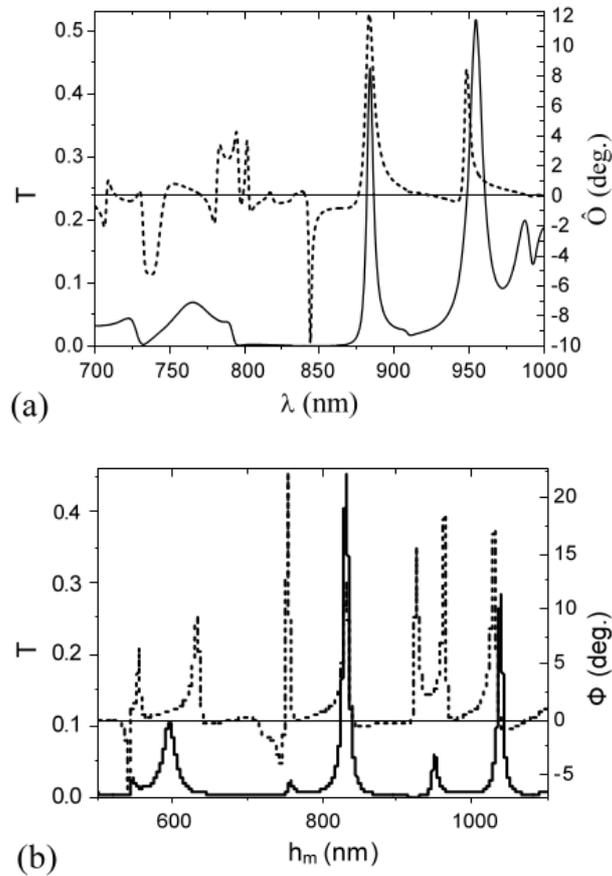
слева – схематический вид процесса изготовления структуры; справа – РЭМ изображение поперечного сечения структуры

Рис. 9. Каскадная металлическая структура [24]

В связи с этим можно надеяться, что МО эффекты могут быть еще более заметны в каскадных металлических структурах, содержащих два перфорированных металлических слоя, разделенных магнитным слоем.

Преимущества таких структур для оптических применений были показаны в [25-27]. Добавление второй металлической решетки на нижнюю поверхность магнитного слоя изменяет условия распространения мод в диэлектрическом слое, что позволяет дополнительно увеличить эффективность МО взаимодействия и дальнейшее уменьшение групповой скорости в точке резонанса. На рис. 10 а показаны спектры пропускания и фарадеевского вращения одной из возможных каскадных структур. Оба пика точно совпадают, обеспечивая 17-кратное усиление эффекта Фарадея и 43 % пропускания на длине волны $\lambda = 884$ нм. Зависимости от толщины магнитной пленки (см. рис. 10 б) показывают, что отрицательные пики угла фарадеевского вращения возникают при пренебрежимо малом пропускании, а положительные максимумы, очевидно, не коррелируют с какими-либо признаками спектров пропускания. Геометрические параметры обеих металлических решеток одинаковы: ширина полосы $d = 832$ нм, ширина промежутка $r = 301$ нм, толщина полос золота 194 нм. Как и в случае бислоев металл/диэлектрик, положение положительных максимумов угла фарадеевского вращения определяется резонансами TE-мод диэлектрической пленки и может определяться ее толщиной. Резонансы пропускания в основном зависят от параметров металлических решеток. Поскольку в каскадных системах имеется две независимые решетки, управление

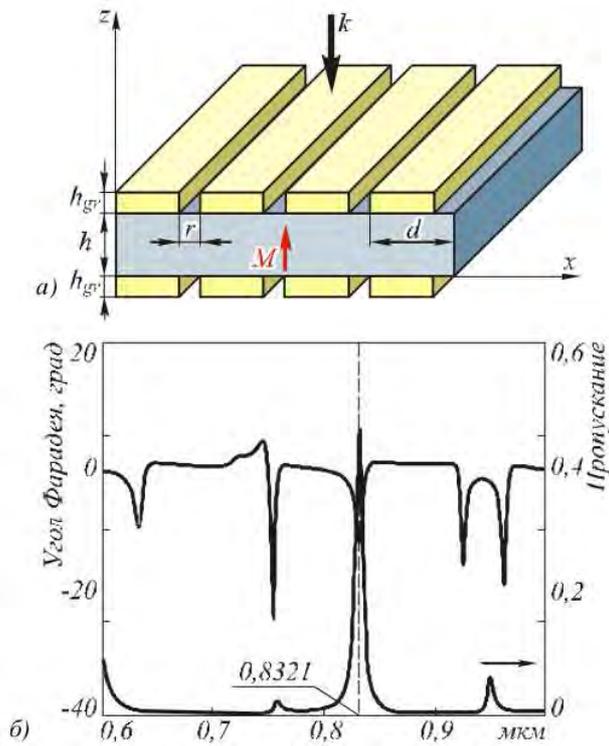
положением пиков пропускания облегчается.



сплошная линия – оптическое пропускание, пунктирная – фарадеевское вращение

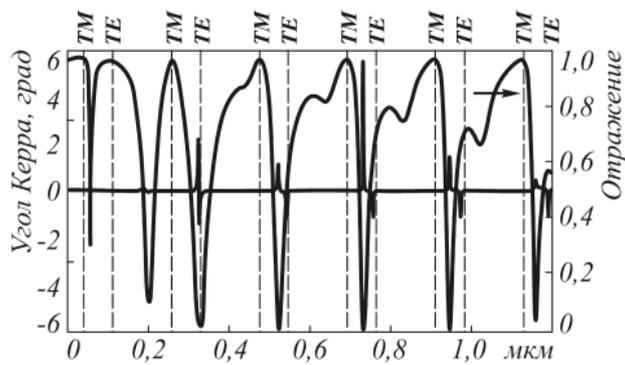
Рис. 10. Зависимости коэффициента пропускания и угла фарадеевского вращения каскадной металл/диэлектрической пленки: а – от длины волны λ ($h_m = 832$ нм), б – от толщины магнитного слоя h_m ($\lambda = 884$ нм) [25]

В работе [26] предложены каскадные структуры, близкие по параметрам, рассмотренным выше. На рис. 11 представлена трёхслойная каскадная гетероструктура, содержащая две дифракционные решетки (Au), и магнитный слой (Bi:YIG) и приведены спектры пропускания и угла Фарадея для этой структуры. В [27] показаны спектры керровского вращения для этой же структуры (рис. 12).



а – схема гетероструктуры; б – спектры пропускания и угла Фарадея при следующих параметрах структуры: $d = 832$ нм, $r = 362$ нм, $h_{gr} = 194$ нм, $h = 832$ нм

Рис. 11. Гетероструктура, содержащая две дифракционные решётки (Au) и магнитный слой (Bi:YIG) [26]



Вертикальные линии – толщины возбуждения мод (параметры структуры: $d = 832$ нм, $r = 362$ нм, $h_{gr} = 194$ нм, $h = 832$ нм)

Рис. 12. Отражение и угол Керра в зависимости от толщины намагниченного слоя при нормальном падении волны [27]

2.3. Двумерный магнитоплазмонный кристалл

В [28, 29] рассмотрены МО эффекты в двумерных МПК. Схематичное изображение такого кристалла показано на рис. 13. Металлическая пластина (верхний слой) периодически перфорирована квадратными отверстиями. Квадратные отверстия составляют решетку периода d . Размер каждого отверстия равен r . Диэлектрический слой (нижний слой) толщиной h_m намагничен в полярной геометрии (вдоль оси Z). Свет с волновым вектором \mathbf{k} падает нормально к поверхности структуры.

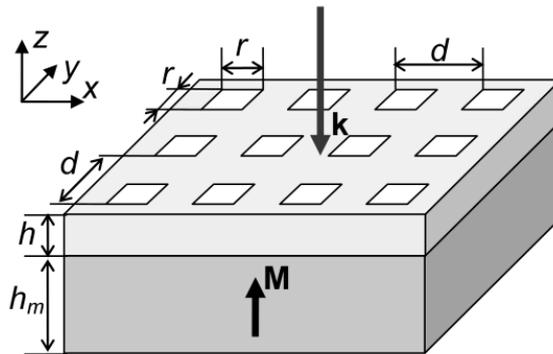


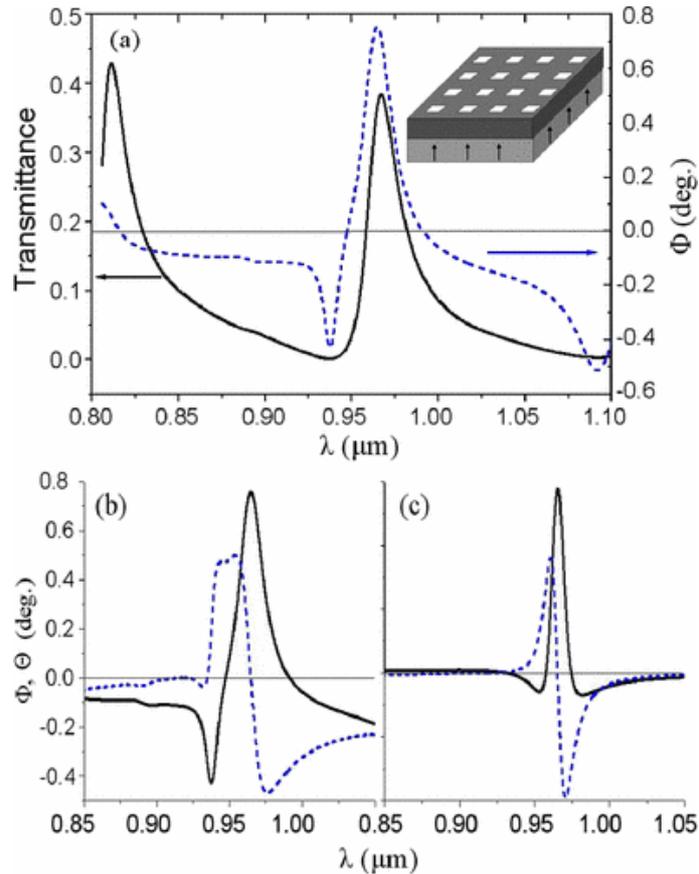
Рис. 13. Двумерный магнитоплазмонный кристалл [28]

МПК состоит из однородной пленки Bi:YIG толщиной 118 нм и перфорированной Au пленки толщиной 68 нм на ее поверхности; период решетки $d = 750$ нм, размер отверстия $r = 395$ нм.

Спектры оптического пропускания, фарадеевского и керровского вращения в рассматриваемой системе приведены на рис. 14 [29]. Эффекты Фарадея и Керра описываются углами поворота поляризации Φ_F и Φ_K и параметрами эллиптичности поляризации [30] Θ_F и Θ_K , соответственно.

Спектр пропускания двойного слоя Au/Bi:YIG имеет несколько резонансных пиков, которые связаны с поверхностными волнами в пленках. В то же время в окрестности некоторых пиков обнаружено выраженное усиление эффекта Фарадея, а именно, при $\lambda_{\text{max}} = 967$ нм, примерно, в 5-10 раз по сравнению с одиночным магнитным слоем. Так, из рисунка 14 а видно, что когда коэффициент пропускания достигает примерно 35 %, угол фарадеевского вращения достигает $0,78^\circ$.

Оптические и МО спектры, представленные на рис. 14, получены для магнитной пленки толщиной $h_m = 118$ нм. При изменении толщины пленки все спектры существенно изменяются. Положительные и отрицательные резонансы в спектре фарадеевского вращения также наблюдаются в пленках с другими толщинами, но все они соответствуют меньшему усилению. При какой-либо другой длине волны падающего света форма резонансной зависимости от толщины будет изменяться. Подобно одномерным плазмонным кристаллам резонансы в спектрах пропускания и фарадеевского вращения не полностью коррелируют, и их совпадение проявляется только в узком интервале значений толщины пленки.



а – спектры оптического пропускания (сплошная линия), фарадеевского вращения (пунктирная линия); б – фарадеевского вращения (сплошная линия), параметра эллиптичности поляризации (пунктирная линия); с – керровского вращения (сплошная линия), параметра эллиптичности поляризации (пунктирная линия)

Рис. 14. Оптические и магнитооптические спектры двумерного магнитоплазмонного кристалла [29]

В работе [31] теоретически рассмотрено явление усиления интенсивности электромагнитного поля в ближней зоне дифракционных структур с двумерной периодичностью, состоящих из диэлектрической дифракционной решётки и волноводного слоя (рис. 15). Авторы предлагают использовать эту структуру для усиления обратного эффекта Фарадея. МО обратный эффект Фарадея имеет место, когда свет с круговой поляризацией, падающий на кристалл, индуцирует магнитный момент M . Если среда освещается поляризованным светом, величину обратного эффекта Фарадея (т.е. величину индуцированного магнитного момента) можно записать в виде

$$M = \lambda V \cdot (I_R - I_L) / 2\pi c, \quad (2)$$

где λ – длина волны света; V – постоянная Верде среды; I_R и I_L – интенсивности компонент падающего света, имеющих правую и левую круговую поляризацию, соответственно.

В случае, когда падающая волна имеет эллиптическую (и, в частности, круговую) поляризацию, интенсивности I_R и I_L не равны и в среде возникает магнитный момент, приводящий к её намагничиванию.

Кроме того, из выражения для индуцированного магнитного момента также следует, что величина обратного эффекта Фарадея зависит от постоянной Верде. Для парамагнитной среды она может быть вычислена с помощью выражений

$$V = (4\pi^2\chi) / n\lambda, \quad (3)$$

$$\chi = g/4\pi H, \quad (4)$$

где χ – характеризует величину обычного (прямого) эффекта Фарадея; n – показатель преломления; g – гиротропия среды, H – напряженность внешнего магнитного поля.

Таким образом, для получения большого по величине обратного эффекта Фарадея необходимо использовать материалы, постоянные Верде которых имеют большие значения, или добиться максимально возможного усиления величины M .

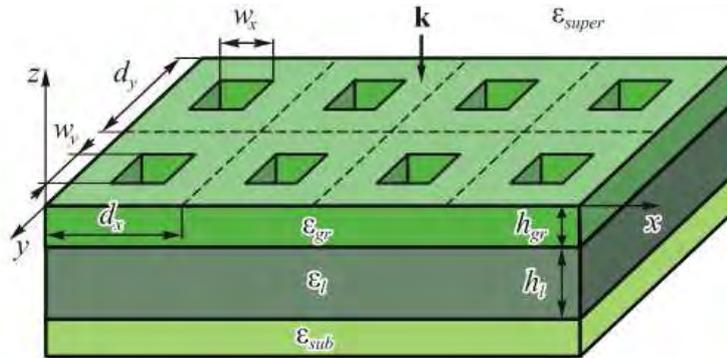


Рис. 15. Геометрия дифракционных структур с двумерной периодичностью, состоящих из диэлектрической дифракционной решётки и волноводного слоя

При определённых условиях, обеспечиваемых выбором геометрических и физических параметров структуры, в ней могут возбуждаться квазиволноводные моды, близкие по структуре поля к модам плоскопараллельного волновода.

Для моделирования дифракции света и построения распределений электромагнитного поля в периодических дифракционных структурах необходимо использование специальных численных методов решения уравнений Максвелла. Результаты численного моделирования дифракции в структуре (рис. 15) в работе [31] получены с помощью метода Фурье-мод.

При численном моделировании предполагалось, что на структуру падает нормально свет с круговой поляризацией и длиной волны 441,6 нм. Для моделирования выбраны следующие значения диэлектрических проницаемостей слоев структуры: $\epsilon_{super} = 1,69$ (для пространства над структурой), $\epsilon_{gr} = \epsilon_1 = 4,41$ (для

диэлектрической дифракционной решётки и волноводного слоя), $\varepsilon_{\text{sub}} = 2,56$ (для подложки). Период дифракционной решётки был выбран равным 660 нм. Остальные геометрические параметры структуры найдены с помощью оптимизационной процедуры из условия минимизации критерия, представляющего отличие расчётной интенсивности электрического поля от теоретической оценки интенсивности при номере дифракционного порядка $n = 3$. Параметры структуры: размер отверстия $w = 413$ нм, толщина диэлектрической дифракционной решётки $h_{\text{gr}} = 153$ нм, толщина волноводного слоя $h_1 = 963$ нм. При указанных параметрах в структуре возбуждаются квазиволноводные моды ТЕ-типа. Отверстие решётки находится в середине периода.

Показано, что обратный эффект Фарадея в таких структурах локально усиливается на порядок в областях с характерными размерами порядка 100 нм при длине волны падающего излучения 441,6 нм. При этом интенсивность электрического поля также локально усиливается и максимумы интенсивности электрического поля совпадают с максимумами индуцированного магнитного поля. Величина обратного эффекта Фарадея в дифракционной структуре более чем в 40 раз превышает соответствующую величину для однородного слоя.

Усиление обратного эффекта Фарадея и интенсивности электрического поля приводит к усилению взаимодействия света с веществом, таким образом, возможно локальное перемагничивание вещества при освещении рассматриваемых структур светом с круговой поляризацией. Последний факт важен для потенциальных применений исследуемого эффекта в устройствах быстрой магнитной записи информации с высокой плотностью. Потенциальные применения рассмотренных структур также включают устройства контроля интенсивности электромагнитного поля и, в частности, оптический транзистор.

Исследования выполнены при финансовой поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации по базовой части государственного задания (проект № 3.7126.2017/8.9).

Список литературы

1. Sarychev A. K., Shalaev V. M. *Electrodynamics of metamaterials*. Singapore : World Scientific Co, 2007. 260 p.
2. One-dimensional magnetophotonic crystals / M. Inoue, K. Arai, T. Fujii, M. Abe // *J. Appl. Phys.* 1999. Vol. 85. Iss. 8. P. 5768–5770.
3. Flat-top response in one-dimensional magnetic photonic bandgap structures with Faraday rotation enhancement / M. Levy, H. C. Yang, M. J. Steel, J. Fujita // *J. Lightwave Technol.* 2001. Vol. 19. Iss. 12. P. 1964–1969.
4. Zvezdin A. K., Belotelov V. I. Magneto-optical properties of two dimensional photonic crystals // *Eur. Phys. J.* 2004. Vol. B37. Iss. 4. P. 479–487.
5. Ritchie R. H. Plasma losses by fast electrons in thin films // *Phys. Rev.* 1957. Vol. 106. Iss. 5. P. 874–881.
6. Stern E. A., Ferrell R. A. Surface plasma oscillations of a degenerate electron gas // *Phys. Rev.* 1960. Vol. 120. Iss. 1. P. 130–136.
7. Hybrid structures of magnetic semiconductors and plasmonic crystals: a novel concept for magneto-optical devices / I. A. Akimov, V. I. Belotelov, A. V. Scherbakov [et al.] // *J. Opt. Soc. Am. B.* 2012. Vol. 29. Iss. 2. P. A103–A118.

8. Belotelov V. I., Kalish A. N., Zvezdin A. K. Magneto-optics of plasmonic crystals // *Magnetophotonics: From theory to applications* / M. Inoue, M. Levy, A.V. Baryshev (eds.). Springer, 2013. P. 51–106.
9. Kretschmann E., Raether H. Radiative decay of non radiative surface plasmons excited by light // *Z. Naturforsch. A*. 1968. Vol. 23. Iss. 12. P. 2135–2136.
10. Kretschmann E. Die Bestimmung optischer Konstanten von Metallen durch Anregung von Oberflächenplasmaschwingungen // *Z. Phys.* 1971. Vol. 241. Iss. 4. P. 313–324.
11. Otto A. Excitation of surface plasma waves in silver by the method of frustrated total reflection // *Z. Phys. A*. 1968. Vol. 216. Iss. 4. P. 398–410.
12. Influence of surface plasmons on the Faraday effect in bismuth-substituted yttrium iron garnet films / J. Bremer, V. Vaicikauskas, F. Hansteen, O. Hunderi // *J. Appl. Phys.* 2001. Vol. 89. No. 11. P. 6177–6182.
13. Highly sensitive sensors based on magneto-optical surface plasmon resonance in Ag/Ce:YIG heterostructures / Jun Qin, Longjiang Deng, Jianliang Xie et al. // *AIP Advances*. 2015. Vol. 5. 017118.
14. Magneto-optical sandwiches for surface plasmon resonance systems / J. Pištora, J. Vlček, M. Lesňák, M. Čada // *Int. J. Microwave Opt. Technol.* 2014. Vol. 9. No. 1. P. 101–105.
15. Plasmon-mediated magneto-optical transparency / V. I. Belotelov, L. E. Kreilkamp, I. A. Akimov et al. // *Nat. Commun.* 2013. Vol. 4. 2128.
16. Extraordinary magneto-optics in plasmonic crystals [Электронный ресурс] / V. I. Belotelov, I. A. Akimov, M. Pohl et al. Режим доступа : <https://arxiv.org/ftp/arxiv/papers/1011/1011.2320.pdf> (дата обращения: 13.02.2017).
17. Магнитоплазмонные кристаллы: резонансные линейные и нелинейные магнитооптические эффекты / А. Л. Чехов, П. Н. Найденов, О. В. Голикова и др. // *Физика твердого тела*. 2016. Т. 58. Вып. 11. С. 2171–2175.
18. Surface-plasmon-induced enhancement of magneto-optical Kerr effect in all-nickel subwavelength nanogratings / A. A. Grunin A. G. Zhdanov, A. A. Ezhov et al. // *Appl. Phys. Lett.* 2010. Vol. 97. Iss. 26. 261908.
19. Magnetic-field modulation of surface plasmon polaritons on gratings / C. Clavero, K. Yang, J. R. Skuza, R. A. Lukaszew // *Opt. Lett.* 2010. Vol. 35. Iss. 10. P. 1557–1559.
20. Localized surface plasmon resonance effects on the magneto-optical activity of continuous Au/Co/Au trilayers/ G. Armelles, J. B. González-Díaz, A. García-Martín et al. // *Optics Express*. 2008. Vol. 16. Iss. 20. P. 16104–16120.
21. Optical and magneto-optical resonances in nanocorrugated ferromagnetic films / M. V. Sapozhnikov, S. A. Gusev, B. B. Troitskii, L. V. Khokhlova // *Opt. Lett.* 2011. Vol. 36. No 21. P. 4197–4199.
22. Optical and magnetic properties of hexagonal arrays of subwavelength holes in optically thin cobalt films / G. Cstis, E. Papaioannou, P. Patoka et al. // *Nano Lett.* 2009. Vol. 9. Iss. 1. P. 1–6.
23. Tunable magneto-photonic response of nickel nanostructures / J. F. Torrado, J. B. González-Díaz, G. Armelles et al. // *Appl. Phys. Lett.* 2011. Vol. 99. Iss. 19. 193109.
24. Ye Y.-H., Zhang J.-Y. Enhanced light transmission through cascaded metal films perforated with periodic hole arrays // *Opt. Lett.* 2005. Vol. 30. Iss. 12. P. 1521–1523.
25. Faraday effect enhancement in metal-dielectric plasmonic systems / V. I. Belotelov, L. L. Doskolovich, V. A. Kotov et al. // *Proc. SPIE*. 2007. Vol. 6581. 65810S1.
26. Сойфер В. А., Котляр В. В., Досколович Л. Л. Дифракционные оптические элементы в устройствах нанофотоники // *Компьютерная оптика*. 2009. Т. 33. № 4. С. 352–368.
27. Резонансные магнитооптические эффекты в дифракционных решетках с намагниченным слоем / Л. Л. Досколович, Е. А. Безус, Д. А. Быков и др. // *Компьютерная оптика*. 2007. Т. 31. № 1. С. 4–8.
28. Belotelov V. I., Doskolovich L. L., Zvezdin A. K. Extraordinary magneto-optical effects and transmission through metal-dielectric plasmonic systems // *Phys. Rev. Lett.* 2007. Vol. 98. No. 7. 077401.
29. Magneto-optical properties of perforated metallic films / V. I. Belotelov, L. L. Doskolovich, V. A. Kotov, A. K. Zvezdin // *J. Magn. Magn. Mater.* 2007. Vol. 310. Iss. 2, pt 3. P. e843–e845.
30. Zvezdin A. K., Kotov V. A. *Modern magneto-optics and magneto-optical materials*. CRC Press, 1997. 404 p.

31. Усиление обратного эффекта Фарадея в диэлектрических дифракционных решётках с волноводным слоем / Е. А. Безус, В. И. Белотелов, Л. Л. Досколович, А. К. Звездин // Компьютерная оптика. 2011. Т. 35. № 4. С. 432–437.

MAGNETOPLASMONIC STRUCTURES (REVIEW). PART 1

Basiladze G. D., Berzhansky V. N., Nedviga A. S. , Shaposhnikov A. N.*

Physics and Technology Institute, V. I. Vernadsky Crimean Federal University, Simferopol 295007, Russia

*E-mail: nedviga@list.ru

The paper presents a promising class of nanostructures with combined magnetic and plasmonic functional capabilities – magnetoplasmonic nanostructures. The realization of such nanostructures is carried out using magnetic layers of ferromagnetic metals or magnetodielectrics. The magnetic activity of nanostructures allows to govern their plasmonic properties by means of an external magnetic field, changing the spectral position of the resonance, which makes it possible to create active plasmonic devices for optical signal control systems and magneto-optical sensors.

Keywords: plasmon resonance, magnetoplasmonics, garnet film, magnetophotonic crystal, plasmonic nanostructure.

References

1. A. K. Sarychev, V. M. Shalaev, *Electrodynamics of metamaterials* (World Scientific Publishing Co. Pte. Ltd., 2007).
2. M. Inoue, K. Arai, T. Fujii, M. Abe, *J. Appl. Phys.* **85**, Issue 8, 5768–5770 (1999).
3. M. Levy, H. C. Yang, M. J. Steel, J. Fujita, *J. Lightwave Technol.* **19**, Issue 12, 1964–1969 (2001).
4. A. K. Zvezdin, V. I. Belotelov, *Eur. Phys. J.* **B37**, Issue 4, 479–487 (2004).
5. R. H. Ritchie, *Phys. Rev.* **106**, Issue 5, 874–881 (1957).
6. E. A. Stern, R. A. Ferrell, *Phys. Rev.* **120**, Issue 1, 130–136 (1960).
7. I. A. Akimov, V. I. Belotelov, A. V. Scherbakov, M. Pohl, A. N. Kalish, A. S. Salasyuk, M. Bombeck, C. Brüggemann, A. V. Akimov, R. I. Dzhiyev, V. L. Korenev, Yu. G. Kusrayev, V. F. Sapega, V. A. Kotov, D. R. Yakovlev, A. K. Zvezdin, M. Bayer, *J. Opt. Soc. Am. B.* **29**, Issue 2, A103–A118 (2012).
8. V. I. Belotelov, A. N. Kalish, A. K. Zvezdin, “Magneto-optics of plasmonic crystals” in *Magnetophotonics: From theory to applications*, M. Inoue, M. Levy, A. V. Baryshev (eds.), (Springer, 2013) P. 51–106.
9. E. Kretschmann, H. Raether, *Z. Naturforsch. A.* **23**, Issue 12, 2135–2136 (1968).
10. E. Kretschmann, *Z. Phys.* **241**, Issue 4, 313–324 (1971).
11. A. Otto, *Z. Phys. A.* **216**, Issue 4, 398–410 (1968).
12. J. Bremer, V. Vaicikauskas, F. Hansteen, O. Hunderi, *J. Appl. Phys.* **89**, No 11, 6177–6182 (2001).
13. J. Qin, L. Deng, J. Xie, T. Tang, L. Bi, *AIP Advances*, **5**, 0171182015.
14. J. Pištora, J. Vlček, M. Lesňák, M. Čada, *Int. J. Microwave Opt. Technol.* **9**, No 1, 101–105 (2014).
15. V. I. Belotelov, L. E. Kreilkamp, I. A. Akimov, A. N. Kalish, D. A. Bykov, S. Kasture, V. J. Yallapragada, Achanta Venu Gopal, A. M. Grishin, S. I. Khartsev, M. Nur-E-Alam, M. Vasiliev, L. L. Doskolovich, D. R. Yakovlev, K. Alameh, A. K. Zvezdin, M. Bayer, *Nat. Commun.* **4**, 2128 (2013).
16. V. I. Belotelov, I. A. Akimov, M. Pohl, V. A. Kotov, S. Kasture, A. S. Vengurlekar, A. V. Gopal, D. Yakovlev, A. K. Zvezdin, M. Bayer, Available: <https://arxiv.org/ftp/arxiv/papers/1011/1011.2320.pdf>.
17. A. L. Chekhov, P. N. Naydenov, O. V. Golikova, A. V. Bespalov, A. I. Stognij, T. V. Murzina, *Fiz. Tverd. Tela* **58**, Issue 11, 2171–2175 (2016) [in Russian] [*Phys. Solid State* **58**, Issue 11, 2251–2255 (2016)].
18. A. A. Grunin, A. G. Zhdanov, A. A. Ezhov, E. A. Ganshina, A. A. Fedyanin, *Appl. Phys. Lett.* **97**, Issue 26, 261908 (2010).

19. C. Clavero, K. Yang, J. R. Skuza, R. A. Lukaszew, *Opt. Lett.* **35**, Issue 10, 1557–1559 (2010).
20. G. Armelles, J. B. González-Díaz, A. García-Martín, J. M. García-Martín, A. Cebollada, M. U. González, S. Acimovic, J. Cesario, R. Quidant, G. Badenes, *Optics Express* **16**, Issue 20, 16104–16120 (2008).
21. M. V. Sapozhnikov, S. A. Gusev, B. B. Troitskii, L. V. Khokhlova, *Opt. Lett.* **36**, No 21, 4197–4199 (2011).
22. Optical and magnetic properties of hexagonal arrays of subwavelength holes in optically thin cobalt films / G. Cistis, E. Papaioannou, P. Patoka, J. Gutek, P. Fumagalli, M. Giersig, *Nano Lett.* **9**, Issue 1, 1–6 (2009).
23. J. F. Torrado, J. B. González-Díaz, G. Armelles, A. García-Martín, A. Altube, M. López-García, J. F. Galisteo-López, A. Blanco, C. López, *Appl. Phys. Lett.* **99**, Issue 19, 193109 (2011).
24. Ye Y.-H., Zhang J.-Y., *Opt. Lett.* **30**, Issue 12, 1521–1523 (2005).
25. V. I. Belotelov, L. L. Doskolovich, V. A. Kotov, E. A. Bezus, D. A. Bykov, A. K. Zvezdin, Proc. SPIE **6581**, 65810S1 (2007).
26. V. A. Soifer, V. V. Kotlyar, L. L. Doskolovich, *Komp'yuternaya optika [Computer Optics]* **33**, No 4, 352–368 (2009) [in Russian].
27. L. L. Doskolovich, E. A. Bezus, D. A. Bykov, V. I. Belotelov, A. K. Zvezdin, *Komp'yuternaya optika [Computer Optics]* **31**, No 1, 4–8 (2007) [in Russian].
28. V. I. Belotelov, L. L. Doskolovich, A. K. Zvezdin, *Phys. Rev. Lett.* **98**, No 7, 077401 (2007).
29. V. I. Belotelov, L. L. Doskolovich, V. A. Kotov, A. K. Zvezdin, *J. Magn. Magn. Mater.* **310**, Issue 2, pt 3, e843–e845 (2007).
30. A. K. Zvezdin, V. A. Kotov. *Modern magneto-optics and magneto-optical materials* (CRC Press, 1997).
31. E. A. Bezus, V. I. Belotelov, L. L. Doskolovich, A. K. Zvezdin, *Komp'yuternaya optika [Computer Optics]* **35**, No 4, 432–437 (2011) [in Russian].

*Поступила в редакцию 10.11.2017 г. Принята к публикации 22.12.2018 г.
Received November 11, 2017. Accepted for publication December 22, 2017*

УДК 535.137

ПОВЕРХНОСТНЫЕ ПЛАЗМОН-ПОЛЯРИТОНЫ НА ГРАНИЦЕ МЕТАЛЛА И ДИЭЛЕКТРИЧЕСКОГО КРИСТАЛЛА СО СВЕРХРЕШЕТКОЙ

*Горишний В. А., Перескоков В. С., Дзедолик И. В.**

*Физико-технический институт, Крымский федеральный университет имени
В. И. Вернадского, Симферополь 295007, Россия
E-mail: igor.dzedolik@cfuv.ru

Диэлектрическая проницаемость фоторефрактивного кристалла может быть промодулирована лазерным пучком, в результате чего в кристалле генерируется сверхрешетка. Если одна из граней кристалла покрыта слоем металла, то на границе кристалла и металла могут быть возбуждены поверхностные плазмон-поляритоны (ППП). ППП распространяются в плоскости сверхрешетки, взаимодействуют со сверхрешеткой в кристалле, при этом с границы кристалла и металла излучаются объемные электромагнитные волны. Теоретически показано, что отношение интенсивности ППП и объемных электромагнитных волн, излучаемых с границы кристалла и металла, зависит от периода сверхрешетки и глубины модуляции диэлектрической проницаемости кристалла. Записывая в фоторефрактивном кристалле сверхрешетки с различными периодами, можно управлять параметрами ППП и излучаемых объемных электромагнитных волн.

Ключевые слова: фоторефрактивный кристалл, сверхрешетка, плазмон-поляритон.

PACS: 73.20.Mf

ВВЕДЕНИЕ

Свойства плазмон-поляритонов (ППП) активно изучаются с начала 80-х годов XX века, в частности, для выявления характеристик поверхностей различных сред [1-8]. В последнее время свойства ППП активно исследуются в связи с созданием фотонных и плазмонных элементов для управления оптическими сигналами [9-15].

ППП привязаны к границе раздела проводящих сред и являются не излучаемыми волнами [1]. Внешним высокочастотным (оптическим) электромагнитным полем на границе металлического слоя и кристалла, расположенного над слоем, можно возбудить ППП, которые распространяются вдоль границ слоя. Возбуждение ППП возможно различными способами. Например, направляя под соответствующим углом лазерный пучок на стеклянную призму, расположенную с нижней стороны металлического слоя согласно схеме Кретчманна [1], можно возбудить ППП на верхней поверхности слоя. Для возбуждения ППП на границе кристалла и металла необходимо, чтобы выполнялись условия равенства тангенциальной компоненты вектора падающей электромагнитной волны и волнового вектора ППП. При этом в металлическом слое на верхней поверхности возбуждятся ППП, которые могут трансформироваться в объемные электромагнитные волны при наличии неоднородностей на границе кристалла и металла, а объемные волны могут высветиться с верхней поверхности металла через кристалл.

Генерируемые на границе объемные электромагнитные волны должны быть поляризованы также, как и ППП – в плоскости, нормальной к поверхности металла.

В результате анализа параметров излученных электромагнитных волн (поляризации и интенсивности), можно легко выявить эффект генерации ППП в исследуемой системе. Цель работы – выявить и проанализировать параметры, определяющие условия генерации ППП на границе фоторефрактивного кристалла со сверхрешеткой и слоя металла, а также условия излучения электромагнитных волн с границы кристалла и металла.

1. ППП НА ГРАНИЦЕ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКОГО КРИСТАЛЛА И МЕТАЛЛА

1.1. ППП в слоистой среде

Рассмотрим генерацию ППП на границе диэлектрика и металла монохроматической волной $\sim \exp[i(k_x x + k_z z - \omega t)]$, поляризованной в плоскости падения. Если обе среды не обладают магнитными свойствами, то на их границе возбуждаются ППП, распространяющиеся вдоль оси z на ТМ-режиме с компонентами E_x, E_z электрического поля и B_y магнитного поля [1-8]. Пока в фоторефрактивном кристалле сверхрешетка не записана [16], исследуемую систему «диэлектрическая стеклянная призма – металл – кристалл» можно представить как слоистую среду с постоянной диэлектрической проницаемостью слоев $\varepsilon_j = \text{const}$, где $j = G, M, C$, G – стеклянная призма, M – металлический слой, C – фоторефрактивный кристалл (рис. 1).

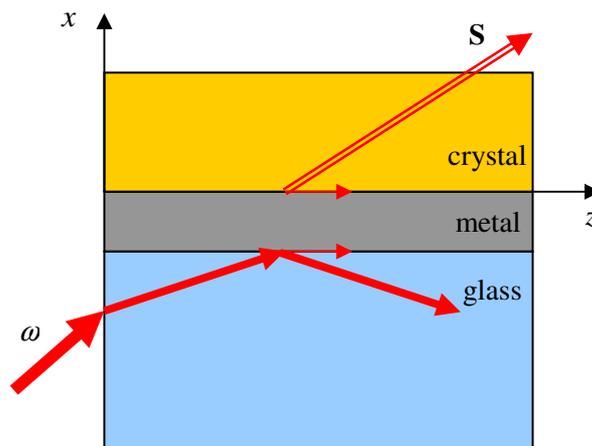


Рис. 1. Слоистая система «диэлектрическая стеклянная призма – металл – кристалл»

Полагаем, что слой металла толщиной h с диэлектрической проницаемостью ε_M расположен между двумя однородными полубесконечными средами с диэлектрическими проницаемостями ε_G и ε_C . Дисперсионное уравнение для ППП в слое металла имеет вид [1]

$$\left(1 + \frac{q_G}{q_C}\right) \left(\frac{q_G}{q_M} + \frac{q_M}{q_C}\right)^{-1} = \tanh(ik_{xM}h), \quad (1)$$

где $q_j = k_{jx} / \varepsilon_j$.

При $k_{xM} = -i\alpha$, где α – действительная величина, $\tanh(\alpha h) \rightarrow 1$ для оптически толстого металлического слоя $\alpha h \gg 1$. Тогда из (1) получаем уравнение $(q_G - q_M)(q_C - q_M) = 0$. В оптически толстом металлическом слое ППП распространяются независимо вдоль нижней и верхней поверхности металла,

$$\beta_A^2 = \frac{\omega^2}{c^2} \frac{\varepsilon_M \varepsilon_G}{\varepsilon_M + \varepsilon_G}, \quad \beta_T^2 = \frac{\omega^2}{c^2} \frac{\varepsilon_M \varepsilon_C}{\varepsilon_M + \varepsilon_C}, \quad (2)$$

в приповерхностном слое толщиной $\sim 1/\alpha$. Диэлектрическая высокочастотная проницаемость металла является комплексной величиной $\varepsilon_M = -\varepsilon' + i\varepsilon''$, поэтому, как следует из выражений (2), продольная компонента волнового вектора ППП $\beta = \beta' + i\beta''$ также будет комплексной величиной. Ее мнимая часть характеризует затухание поверхностных волн вдоль оси z , т.е. определяет длину распространения ППП $L_{SPP} = 1/2\beta''$ [8].

Таким образом, возбуждая ППП на нижней поверхности металла, можно возбудить ППП на верхней поверхности металла, свойства которых мы будем рассматривать в дальнейшем.

1.2. ППП на неоднородной границе

Рассмотрим возбуждение ППП на неоднородной плоской границе диэлектрического одноосного кристалла и металла. ППП, распространяющиеся вдоль верхней границы металла, взаимодействуя с неоднородной границей кристалла, передают часть своей энергии объемным электромагнитным волнам, которые излучаются с поверхности металла через кристалл.

Одноосный кристалл характеризуется тензором диэлектрической проницаемости вида $\varepsilon = \text{diag}(\varepsilon_{\perp}, \varepsilon_{\perp}, \varepsilon_{\parallel})$. В общем случае неоднородность границы описывается зависимостью компонент диэлектрической проницаемости кристалла и металла $\varepsilon_M(x, y, z)$ от координат. В рассматриваемом случае граница кристалла и металла – плоская, а неоднородность границы обусловлена периодическим изменением диэлектрической проницаемости кристалла. Возбуждая ППП на нижней поверхности металлического слоя (рис. 1), можно получить излучение объемных электромагнитных волн с верхней поверхности металла при наличии сверхрешетки в кристалле в результате трансформации энергии ППП, возникших на верхней поверхности металла.

Компоненты монохроматического электрического поля ППП $\sim \exp(-i\omega t)$ на ТМ-моду $E_x(x, z)$ и $E_z(x, z)$ выражаются через компоненту поперечного магнитного поля $B_y(x, z)$,

в кристалле

$$E_x = -i \frac{c}{\omega \epsilon_{\perp}} \frac{\partial B_y}{\partial z}, \quad E_z = i \frac{c}{\omega \epsilon_{\parallel}} \frac{\partial B_y}{\partial x}, \quad (3)$$

и в металле

$$E_x = -i \frac{c}{\omega \epsilon_M} \frac{\partial B_y}{\partial z}, \quad E_z = i \frac{c}{\omega \epsilon_M} \frac{\partial B_y}{\partial x}. \quad (4)$$

Магнитная компонента $B_y(x, z)$ поля ППП удовлетворяет дифференциальным уравнениям в частных производных с переменными коэффициентами, в кристалле

$$\begin{aligned} \frac{\partial^2 B_y}{\partial x^2} + \frac{\epsilon_{\parallel}}{\epsilon_{\perp}} \frac{\partial^2 B_y}{\partial z^2} - \frac{1}{\epsilon_{\parallel}} \frac{\partial \epsilon_{\parallel}}{\partial x} \frac{\partial B_y}{\partial x} \\ - \frac{\epsilon_{\parallel}}{\epsilon_{\perp}^2} \frac{\partial \epsilon_{\perp}}{\partial z} \frac{\partial B_y}{\partial z} + \frac{\omega^2}{c^2} \epsilon_{\parallel} B_y = 0, \end{aligned} \quad (5)$$

и в металле

$$\begin{aligned} \frac{\partial^2 B_y}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 B_y}{\partial z^2} - \frac{1}{\epsilon_M} \frac{\partial \epsilon_M}{\partial x} \frac{\partial B_y}{\partial x} \\ - \frac{1}{\epsilon_M} \frac{\partial \epsilon_M}{\partial z} \frac{\partial B_y}{\partial z} + \frac{\omega^2}{c^2} \epsilon_M B_y = 0. \end{aligned} \quad (6)$$

Из граничных условий для тангенциальных электрических компонент $E_{zC} = E_{zM}$ следует соотношение $\frac{1}{\epsilon_{\parallel}} \frac{\partial B_{yC}}{\partial x} \Big|_{x=0} = \frac{1}{\epsilon_M} \frac{\partial B_{yM}}{\partial x} \Big|_{x=0}$, а для магнитных компонент имеет место равенство $B_{yC} = B_{yM}$. Предположим, что поперечная ϵ_{\perp} и продольная ϵ_{\parallel} компоненты тензора диэлектрической проницаемости кристалла меняются только вдоль оси распространения ППП z , $\epsilon_{\perp} = \epsilon_{C\perp} + f_{\perp}(z)$, $\epsilon_{\parallel} = \epsilon_{C\parallel} + f_{\parallel}(z)$, а от поперечных координат x, y вблизи границы кристалла не зависят. В этом случае решения уравнений (5) и (6) можно представить в форме $B_y = B(z) \exp(\alpha x + i\beta z)$, где $\alpha = \alpha' + i\alpha''$, $\beta = \beta' + i\beta''$ – комплексные величины. Из (5) и (6) получаем, что B удовлетворяет следующим уравнениям: в кристалле

$$\frac{\partial^2 B}{\partial z^2} + b_1(z) \frac{\partial B}{\partial z} + b_2(z) B = 0, \quad (7)$$

и в металле

$$\frac{\partial^2 B}{\partial z^2} + b_3(z) \frac{\partial B}{\partial z} + b_4(z) B = 0, \quad (8)$$

где $b_1 = i2\beta - \partial(\ln \varepsilon_{\perp})/\partial z$, $b_2 = c^{-2}\omega^2 \varepsilon_{\perp} + \alpha_c^2 \varepsilon_{\perp} / \varepsilon_{\parallel} - \beta^2 - i\beta \partial(\ln \varepsilon_{\perp})/\partial z$,
 $b_3 = i2\beta - \partial(\ln \varepsilon_M)/\partial z$, $b_4 = c^{-2}\omega^2 \varepsilon_M + \alpha_M^2 - \beta^2 - i\beta \partial(\ln \varepsilon_M)/\partial z$.

Для однородной границы кристалла и металла $\varepsilon_{c\perp} = const$, $\varepsilon_{c\parallel} = const$, $B = const$, тогда из (7) и (8) получаем дисперсионные уравнения $c^{-2}\omega^2 \varepsilon_{c\perp} - k_c^2 \varepsilon_{c\perp} / \varepsilon_{c\parallel} - \beta^2 = 0$ и $c^{-2}\omega^2 \varepsilon_M - k_M^2 - \beta^2 = 0$. С учетом выражения, следующего из граничных условий $k_c^2 / \varepsilon_{c\parallel}^2 = k_M^2 / \varepsilon_M^2$, находим значения компонент волновых векторов $\alpha_c = c^{-1}\omega\sqrt{\varepsilon_{c\parallel}^2 \tilde{\varepsilon}^{-1}}$, $\alpha_M = c^{-1}\omega\sqrt{\varepsilon_M^2 \tilde{\varepsilon}^{-1}}$, $\beta = c^{-1}\omega\sqrt{\varepsilon_{c\perp}(1 + \varepsilon_{c\parallel} \tilde{\varepsilon}^{-1})}$, где $\tilde{\varepsilon}^{-1} = (\varepsilon_{c\perp} - \varepsilon_M)(\varepsilon_M^2 - \varepsilon_{c\perp} \varepsilon_{c\parallel})^{-1}$.

Компонента магнитного поля ППП на границе кристалла и металла имеет вид $B_y = \tilde{B} \exp(-\alpha_c x + i\beta z - i\omega t + i\tilde{\phi})$, где $\tilde{B} = [B''(z) + B''^2(z)]^{1/2}$, $\tilde{\phi} = \arctan[B''(z)/B'(z)]$. Действительная часть α_c' характеризует ширину приповерхностного слоя, в котором сосредоточена энергия ППП в кристалле, а мнимая часть α_c'' – поперечная компонента волнового вектора ППП, $\tilde{\phi}$ – сдвиг фаз поля в результате неоднородности границы. Задавая вид зависимостей компонент диэлектрической проницаемости кристалла $\varepsilon_{\perp} = \varepsilon_{c\perp} + f_{\perp}(z)$, $\varepsilon_{\parallel} = \varepsilon_{c\parallel} + f_{\parallel}(z)$ от z , можно найти значения компонент электромагнитного поля ППП E_x, E_z, B_y в результате численного решения уравнения (7).

1.3. ППП при наличии сверхрешетки в кристалле

Один из возможных способов изменения диэлектрической проницаемости кристалла – это запись сверхрешетки в фоторефрактивном кристалле. В фоторефрактивном кристалле с помощью интерференции лазерных пучков можно записать сверхрешетку с периодом от единиц до десятков микрон [16]. Если на грань такого кристалла, параллельную плоскости сверхрешетки, нанести металлическое покрытие, то диэлектрическая проницаемость на границе кристалла и металла будет неоднородной – она будет изменяться с периодом сверхрешетки (рис. 2).

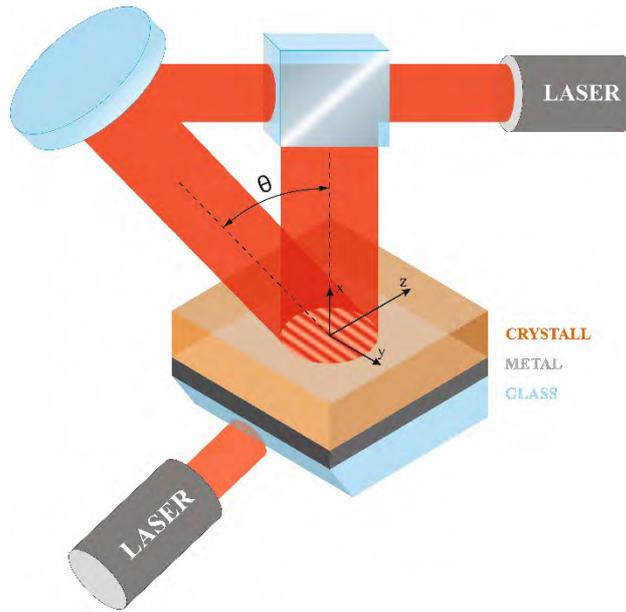


Рис. 2. Схема записи сверхрешетки в фоторефрактивном кристалле, при которой возникает неоднородность плоской границы диэлектрической среды и металла для ППП

Период записываемой в кристалле решетки равен $\Lambda_\theta = \lambda_0 / \sin(\theta/2)$, где θ – угол схождения интерферирующих лазерных пучков при записи решетки, λ_0 – длина волны лазерного излучения в воздухе. Зависимость компонент диэлектрической проницаемости кристалла от z при записи решетки имеет вид $\varepsilon_\perp = \varepsilon_{c\perp} + \varepsilon_{a\perp} \sin(Kz)$, $\varepsilon_\parallel = \varepsilon_{c\parallel} + \varepsilon_{a\parallel} \sin(Kz)$, где $\varepsilon_{a\perp} \ll 1$, $\varepsilon_{a\parallel} \ll 1$, $K = 2\pi/\Lambda$, Λ – пространственный период решетки.

2. ППП И ОБЪЕМНЫЕ ВОЛНЫ НА НЕОДНОРОДНОЙ ПЛОСКОЙ ГРАНИЦЕ

2.1. Вектор Пойнтинга ППП на границе кристалла и металла

Вектор Пойнтинга ППП, возбужденных на ТМ-моде, имеет поперечную и продольную компоненты $\mathbf{S}(t, x, z) = \mathbf{S}_x(t, x, z) + \mathbf{S}_z(t, x, z)$. Нормальная к границе раздела металла и кристалла компонента вектора Пойнтинга $S_x(t, x, z) = -(c/4\pi) \text{Re} E_z \text{Re} B_y$, усредненная по времени, имеет вид

$$\bar{S}_x(x, z) = \frac{ic^2}{16\pi\omega} \left(\frac{\alpha_c}{\varepsilon_\parallel} - \frac{\alpha_c^*}{\varepsilon_\parallel^*} \right) (B'^2 + B''^2) e^{-2(\alpha_c x + \beta z)}, \quad (9)$$

а его продольная компонента $S_z(t, x, z) = (c/4\pi) \text{Re} E_x \text{Re} B_y$, имеет вид

$$\bar{S}_z(x, z) = \frac{c^2}{16\pi\omega} \left[\begin{aligned} & \left(\frac{\beta}{\varepsilon_{\perp}} - \frac{\beta^*}{\varepsilon_{\perp}^*} \right) (B'^2 + B''^2) + \\ & + \frac{i}{\varepsilon_{\perp}^*} B \frac{\partial B^*}{\partial z} - \frac{i}{\varepsilon_{\perp}} B^* \frac{\partial B}{\partial z} \end{aligned} \right] e^{-2(\alpha_c' x + \beta'' z)}, \quad (10)$$

где $\bar{S}_j(x, z) = \frac{\omega}{2\pi} \int_0^{2\pi/\omega} dt S_j(t, x, z)$ – усреднение по времени. Из выражений (9) и (10) следует, что компоненты вектора Пойнтинга ППП затухают вдоль осей x и z . В диапазоне частот, в котором кристалл достаточно прозрачен $\varepsilon_{\perp} = \varepsilon_{\perp}^*$, $\varepsilon_{\parallel} = \varepsilon_{\parallel}^*$, будем учитывать потери энергии ППП только в металле. Тогда из выражений (9) и (10) получаем

$$\bar{S}_x(x, z) = -\frac{c^2 \alpha_c''}{8\pi\omega\varepsilon_{\parallel}} (B'^2 + B''^2) e^{-2(\alpha_c' x + \beta'' z)}, \quad (11)$$

$$\bar{S}_z(x, z) = \frac{c^2}{8\pi\omega\varepsilon_{\perp}} \left[\beta' (B'^2 + B''^2) + B' \frac{\partial B''}{\partial z} - B'' \frac{\partial B'}{\partial z} \right] e^{-2(\alpha_c' x + \beta'' z)}. \quad (12)$$

Из выражения (11) следует, что при $\alpha_c'' < 0$ компонента вектора Пойнтинга S_x направлена в положительном направлении оси x , т.е. поток энергии направлен от границы металла в кристалл. ППП трансформируются в объемные волны, излучаемые с поверхности металла через прозрачный кристалл.

2.2. Расчет значений вектора Пойнтинга

Рассмотрим генерацию ППП и трансформацию их в объемные электромагнитные волны на границе конкретного металла и фоторефрактивного кристалла с индуцированной сверхрешеткой. Для расчетов экспериментальных параметров был выбран кристалл ниобата лития $LiNbO_3$, допированный железом Fe^{3+} , на грань которого нанесен оптически толстый слой алюминия Al . Значения диэлектрических проницаемостей сред, взятые для расчетов: $\varepsilon_{c\perp} = 4.88$, $\varepsilon_{c\parallel} = 5.29$, $\varepsilon_M = -40.0 + i4.0$ для частоты падающей электромагнитной волны $\omega = 2.97 \times 10^{15} s^{-1}$ ($\lambda_0 = 0.633 \mu m$ в воздухе).

Эффективность трансформации ППП в объемные электромагнитные волны определим как $\eta = \bar{S}_x(z) / \bar{S}_z(z)$. На рис. 3 представлена динамика отношения усредненных по времени нормальной к границе раздела сред \bar{S}_x компоненты (11) к продольной \bar{S}_z компоненте (12) вектора Пойнтинга на длине затухания ППП $L_{SPR} = 1/2\beta''$ по продольной оси z для различных периодов сверхрешетки при коэффициенте модуляции $\varepsilon_{a\perp} = \varepsilon_{a\parallel} = 0.1$ диэлектрической проницаемости кристалла

$\varepsilon_{\perp} = \varepsilon_{c\perp} + \varepsilon_{a\perp} \sin(Kz)$, $\varepsilon_{\parallel} = \varepsilon_{c\parallel} + \varepsilon_{a\parallel} \sin(Kz)$. ППП возбуждены на ТМ-моду на плоской неоднородной границе одноосного кристалла и металла. Периоды сверхрешеток: кривая 1 – $\Lambda_{10} = 22.8 \mu m$, кривая 2 – $\Lambda_{15} = 15.2 \mu m$, кривая 3 – $\Lambda_{20} = 11.4 \mu m$, индекс у Λ_{θ} обозначает градусы схождения лазерных пучков при записи сверхрешетки. Из рис. 3 следует, что при уменьшении периода сверхрешетки амплитуда осцилляций при трансформации энергии ППП в объемные электромагнитные волны вдоль оси z увеличивается. В эксперименте можно наблюдать интегральную эффективность трансформации, где $\langle \rangle \rightarrow \int_0^W dy \int_0^{L_{SPP}} dz$ – усреднение по площади. Размеры излучающей площадки задаются поперечными размерами лазерного пучка W и длиной распространения ППП L_{SPP} .

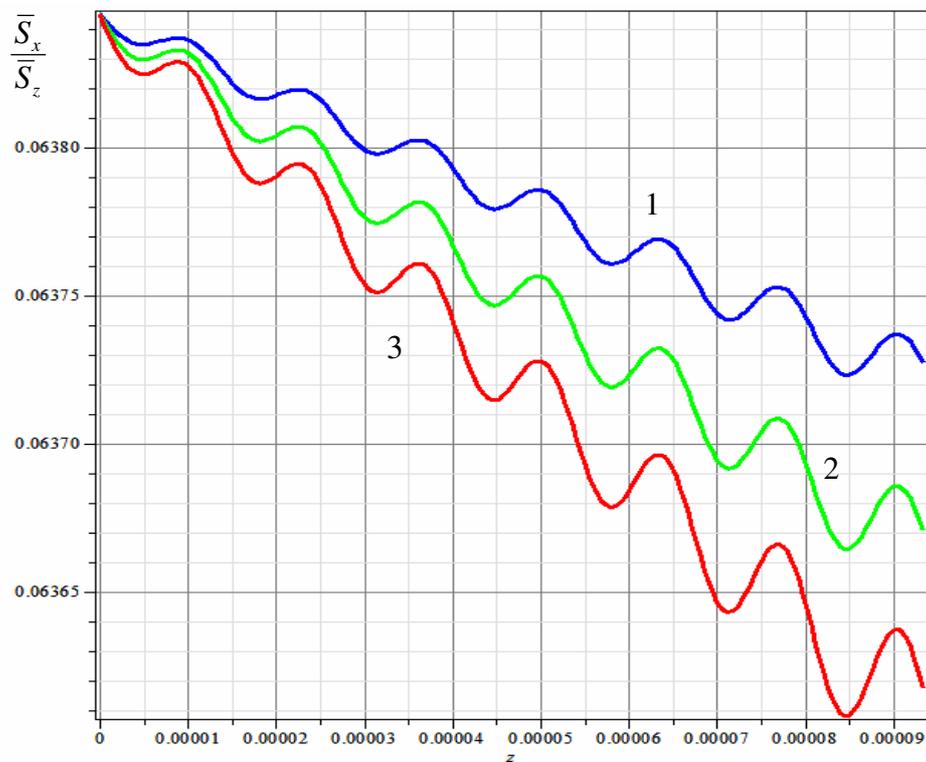


Рис. 3. Динамика отношения $\eta = \bar{S}_x(z)/\bar{S}_z(z)$ усредненных по времени поперечной \bar{S}_x и продольной \bar{S}_z компонент вектора Пойнтинга ППП, единицы измерения по оси z [см]

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Эффективность трансформации ППП η в объемные электромагнитные волны на границе металла и кристалла с модулированной диэлектрической проницаемостью зависит от периода сверхрешетки L_θ , а также от величин и амплитуд модуляции компонент $\varepsilon_{a\perp}$ и $\varepsilon_{a\parallel}$ тензора диэлектрической проницаемости кристалла, и величины диэлектрической проницаемости металла ε_M . Амплитуда осцилляций η увеличивается при уменьшении периода сверхрешетки L_θ .

Изменяя амплитуду и период модуляции диэлектрической проницаемости кристалла, можно управлять параметрами ППП, в частности, их интенсивностью. Записывая в фоторефрактивном кристалле сверхрешетки с различными периодами, можно варьировать неоднородность границы кристалла и металла, и, таким образом, управлять распределением энергии между излучаемыми объемными электромагнитными волнами и не излучаемыми ППП.

На основе рассмотренных свойств фоторефрактивного кристалла с металлизированной гранью можно реализовать управляемые оптические фильтры, конверторы, и другие оптические устройства современной фотоники и плазмоники.

Список литературы

1. Агранович В. М., Миллс Д. Л. Поверхностные поляритоны. М. : Наука, 1985. 525 с.
2. Raether H. Surface plasmons on smooth and rough surface and on gratings. Berlin : Springer-Verlag, 1986. 135 p.
3. Дмитрук Н. Л., Литовченко В. Г., Стрижевский В. Л. Поверхностные поляритоны в полупроводниках и диэлектриках. Киев: Наукова думка, 1989. 376 с.
4. Agranovich V. M. Dielectric permeability and influence of external fields on optical properties of superlattices // Solid State Communications. 1991. Vol. 78. No. 8. P. 747–750.
5. Hecht B., Bielefeld H., Novotny L., Inouye Y., Pohl D. W. Local excitation, scattering, and interference of surface plasmons // Physical Review Letters. 1996. Vol. 77. P. 1889–1892.
6. Krasavin A. V., Zayats A. V., Zheludev N. I. Active control of surface plasmon–polariton waves // Journal of Optics A : Pure and Applied Optics. 2005. Vol. 7. P. S85–S89.
7. Климов В. В. Наноплазмоника. М. : ФИЗМАТЛИТ, 2010. 480 с.
8. Майер С. А. Плазмоника : теория и приложения. М. – Ижевск : НИЦ «Регулярная и хаотическая динамика», 2011. 296 с.
9. Stockman M. I. Nanoplasmonics: past, present, and glimpse into future // Optics Express. 2011. Vol. 19. P. 22029–22106.
10. Dzedolik I. V., Karakchieva O. Transformation of surface plasmon-polariton pulse to the bright and dark solitons at the first and second harmonics // Journal of Optics. 2013. Vol. 15. No. 4. 044019.
11. Dzedolik I. V. Surface plasmon-polariton solitons and cnoidal waves at the boundary of dielectric crystal and metal // Journal of Optics. 2014. Vol. 16. No. 12. 125002.
12. Dzedolik I. V. Solitons and Nonlinear Waves of Phonon-Polaritons and Plasmon-Polaritons. New York : Nova Science Publishers, 2016. 151 p.
13. Complex waveguide based on a magneto-optic layer and a dielectric photonic crystal / N. N. Dadoenkova, I. S. Panyaev, D. G. Sannikov, Y. S. Dadoenkova, I. A. Rozhleys, M. Krawczyk, I. L. Lyubchanskii // Superlattices and Microstructures. 2016. Vol. 100. P. 45-56.
14. Four-layer nanocomposite structure as an effective optical waveguide switcher for near-IR regime / I. S. Panyaev, N. N. Dadoenkova, Y. S. Dadoenkova, I. A. Rozhleys, M. Krawczyk, I. L. Lyubchanskii, D. G. Sannikov // Journal of Physics D : Applied Physics. 2016. Vol. 49. No. 43. 435103.

15. Дзедолик И. В., Перескоков В. С. Топология плазмон-поляритонных вихрей на адаптивном зеркале // Оптика атмосферы и океана. 2016. Т. 29. № 11. С. 954–959.
 16. Петров М. П., Степанов С. И., Хоменко А. В. Фоторефрактивные кристаллы в когерентной оптике. СПб. : Наука, 1992. 320 с.
-

SURFACE PLASMON POLARITONS ON THE BOUNDARY OF METAL AND DIELECTRIC CRYSTAL WITH SUPERLATTICE

*Gorishniy V. A., Pereskokov V. S., Dzedolik I. V.**

Physics and Technology Institute, V. I. Vernadsky Crimean Federal University, Simferopol 295007, Russia

*E-mail: igor.dzedolik@cfuv.ru

The permittivity of a photorefractive crystal can be modulated by laser beam, and it leads to generation of the superlattice in the crystal. If one of the crystal faces is covered by metal layer, then surface plasmon polaritons (SPPs) can be excited at the boundary of the crystal and the metal. Then the SPPs propagate in the plane of the superlattice, interact with the superlattice in the crystal, and the bulk electromagnetic waves are emitted from the crystal and the metal boundary. It is theoretically shown that the ratio of the intensities of the SPPs and of the bulk electromagnetic waves that emitted from the crystal and metal boundary depends on the superlattice period and the depth of modulation of the crystal permittivity. It is possible to control the parameters of the SPPs and the emitted bulk electromagnetic waves by recording of the superlattices with different periods in the photorefractive crystal.

Keywords: photorefractive crystal, superlattice, plasmon polariton.

References

1. V. M. Agranovich, D. L. Mills, *Surface Polaritons : Electromagnetic Waves at Surfaces and Interfaces* (North Holland, 1982).
2. H. Raether, *Surface Plasmons on Smooth and Rough Surface and on Gratings* (Springer-Verlag, 1986).
3. N. L. Dmitruk, V. G. Litovchenko, V. L. Strizhevsky, *Surface Polaritons in Semiconductors and Dielectrics* (Kiev : Naukova dumka, 1989) [in Russian].
4. V. M. Agranovich, *Solid State Communications*, **78**, No. 8. P. 747-750 (1991).
5. B. Hecht, H. Bielefeld, L. Novotny, Y. Inouye, D. W. Pohl, *Physical Review Letters* **77**, 1889–1892 (1996).
6. A. V. Krasavin, A. V. Zayats, N. I. Zheludev, *Journal of Optics A : Pure and Applied Optics* **7**, S85–S89 (2005).
7. V. V. Klimov, *Nanoplasmonics* (Moscow : FIZMATLIT, 2010) [in Russian].
8. S. A. Maier, *Plasmonics : Fundamental and Applications* (New York : Springer, 2007).
9. M. I. Stockman, *Optics Express* **19**, 22029–22106 (2011).
10. I. V. Dzedolik, O. Karakchieva, *Journal of Optics* **15**, 044019 (2013).
11. I. V. Dzedolik, *Journal of Optics* **16**, 125002 (2014).
12. I. V. Dzedolik, *Solitons and Nonlinear Waves of Phonon-Polaritons and Plasmon-Polaritons* (New York : Nova Science Publishers, 2016).
13. N. N. Dadoenkova, I. S. Panyaev, D. G. Sannikov, Y. S. Dadoenkova, I. A. Rozhleys, M. Krawczyk, I. L. Lyubchanskii, *Superlattices and Microstructures* **100**, 45-56 (2016).
14. I. S. Panyaev, N. N. Dadoenkova, Y. S. Dadoenkova, I. A. Rozhleys, M. Krawczyk, I. L. Lyubchanskii, D. G. Sannikov, *Journal of Physics D : Applied Physics* **49**, 435103 (2016).

15. I. V. Dzedolik, V. S. Pereskokov, *Atmospheric and Oceanic Optics* **30**, No. 2, 203–208 (2017).
16. M. P. Petrov, S. I. Stepanov, A. V. Khomenko, *Photorefractive Crystals in Coherent Optics* (Sankt-Petersburg : Nauka, 1992) [in Russian].

*Поступила в редакцию 07.11.2017 г. Принята к публикации 22.12.2017 г.
Received November 07, 2017. Accepted for publication December 22, 2017*

УДК 535.4

УПРАВЛЕНИЕ ОРБИТАЛЬНЫМ УГЛОВЫМ МОМЕНТОМ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ ПОСРЕДСТВОМ МУЛЬТИГЕЛИКОИДАЛЬНОГО ВОЛОКНА С ДЕФЕКТОМ СКРУТКИ

Алексеев К. Н., Лапин Б. П.* , Яворский М. А.

Физико-технический институт, Крымский федеральный университет имени
В.И. Вернадского, Симферополь 295007, Россия

*E-mail: lapinboris@gmail.com

Аналитически продемонстрировано, что создание управляемого дефекта скрутки в оптическом геликоидальном волокне с порядком симметрии l позволяет контролировать орбитальный угловой момент выходящего пучка при его неизменной мощности. Было изучено прохождение гауссова пучка сквозь данное волокно и показано, что управление углом дефекта скрутки позволяет изменять полный орбитальный угловой момент сгенерированного оптического поля в пределах от 0 до l (в произвольных единицах). Также было изучено распределение плотности углового момента в поперечном сечении сгенерированного оптического поля.

Ключевые слова: мультигеликоидальное волокно, орбитальный угловой момент, управление орбитальным угловым моментом.

PACS: 42.25.Bs, 42.81.Qb, 42.81.Bm

ВВЕДЕНИЕ

Ранние исследования скрученных оптических волокон показали, что наличие скрутки приводит к уменьшению поляризационной модовой дисперсии при шаге скрутки порядка десятых долей сантиметра [1]. Иными словами, была достигнута цель сделать волокно, которое почти одинаково воздействует на свет с разным состоянием поляризации. Также было установлено, что данные волокна подобны волокнам с сильным двулучепреломлением [2], которые поддерживают устойчивое распространение линейно поляризованного света. С недавних пор внимание исследователей оказалось обращено на иное свойство скрученных волокон – влиять на свет в зависимости от типа его круговой поляризации. Обширные исследования, проведенные компанией «Chiral Photonics» [3], показали, что хиральные волокна (ХВ) с шагом скрутки H , меньшим 100 мкм, обладают избирательностью по отношению к знаку круговой поляризации излучения [4]. Для длиннопериодных ХВ ($H \propto 100$ мкм) данная избирательность обусловлена резонансным связыванием сердцевинных и оболочечных мод волокна, бегущих в одном направлении [5]. В среднепериодных ХВ с меньшим шагом скрутки H подобная избирательность возникает из-за связывания иных поперечных мод волокна [4]. Кроме того, брэгговские ХВ обладают поляризационной чувствительностью в запрещенной зоне [3, 6]. Данные уникальные свойства ХВ открывают широкие возможности их использования в качестве волоконных сенсоров [7].

Упомянутые выше исследования в основном связаны с мономодовыми волокнами. Тем не менее, начиная с работы Пула и его коллег, было установлено,

что геликоидальные волоконные решётки (ГВР) могут трансформировать фундаментальную моду (ФМ) в высшую $l=1$ моду, где l – орбитальное число моды [8]. Подобное свойство было обнаружено и у наклонных ГВР [9]. С недавних пор вопрос о распространении и генерации оптических вихрей (ОВ) [10] в геликоидальных волокнах (ГВ) снова привлёк внимание исследователей. Было показано, что брэгговские ГВ в линейном режиме способны поддерживать устойчивое распространение ОВ с единичным топологическим зарядом (ТЗ) внутри запрещённой зоны [11]. Кроме того, было установлено, что данные волокна способны изменять ТЗ входящего поля на одну единицу [12, 13]. В общем случае, скрученные волокна с порядком симметрии l поперечного сечения могут менять ТЗ входящего поля на l единиц [14].

В упомянутых выше работах было доложено только о дискретных операциях с орбитальным угловым моментом (ОУМ) входящего поля. Тем не менее, желательно иметь возможность изменять ОУМ выходящего поля непрерывно. В этой связи в данной статье предлагается схема, которая делает возможным непрерывное управление ОУМ выходящего поля с помощью длиннопериодного мультигеликоидального волокна (МГВ) с дефектом скрутки, работающего в линейном режиме.

1. МОДЕЛЬ И МОДЫ ГЕЛИКОИДАЛЬНОГО ВОЛОКНА

Показатель преломления МГВ с дефектом скрутки (Рис.1) можно описать следующим образом:

$$n^2(r, \varphi, z) = \begin{cases} n_{co}^2 (1 - 2\Delta f(r)) - 2n_{co}^2 \Delta \delta r f'_r \cos(l(\varphi - qz)), & z < 0 \\ n_{co}^2 (1 - 2\Delta f(r)) - 2n_{co}^2 \Delta \delta r f'_r \cos(l(\varphi - qz - \theta)), & z \geq 0 \end{cases}, \quad (1)$$

где n_{co} – показатель преломления сердцевины, f – функция профиля, Δ – высота функции профиля, δ – безразмерный параметр, определяющий деформацию поперечного сечения волокна, l – порядок вращательной симметрии МГВ, $q = 2\pi/H$, H – шаг скрутки, θ – угол дефекта скрутки. Цилиндрические координаты (r, φ, z) вводятся стандартным образом.

Наиболее интересные эффекты конверсии падающего на волокно поле наблюдаются в области $q \approx q_0$, где $q_0 = (\beta_0 - \beta_l)/l$, и β_i – скалярная постоянная распространения [15]. Моды данного волокна в данной области можно записать в следующем виде:

$$\begin{aligned} |\psi_1\rangle &= \left\{ c_1 |1, 0\rangle e^{i(\beta_0 + 0.5l\epsilon)z} + c_2 |1, l\rangle e^{i(\beta_l - 0.5l\epsilon)z} \right\} \exp(iz\bar{\beta}), \\ |\psi_2\rangle &= \left\{ -c_2 |1, 0\rangle e^{i(\beta_0 + 0.5l\epsilon)z} + c_1 |1, l\rangle e^{i(\beta_l - 0.5l\epsilon)z} \right\} \exp(-iz\bar{\beta}). \end{aligned} \quad (2)$$

где $c_{1,2} = \frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{1 \pm 1 / \sqrt{1 + (Q/l\varepsilon)^2}}$, $\varepsilon = q - q_0$, $Q^2 \approx A^2 / \beta_0^2$, $\bar{\beta} = \frac{1}{2} \sqrt{l^2 \varepsilon^2 + Q^2}$,
 $A = -\frac{k^2 n_{co}^2 \Delta \delta}{N_0 N_l}$, $k = 2\pi / \lambda$, λ – длина волны излучения, $N_i = \int_0^\infty x F_i^2(x) dx$. Здесь предполагается, что функция профиля f в формуле (1) имеет ступенчатый вид, а функция F_i удовлетворяет стандартному уравнению [16]. Поля $|1, m\rangle$, где $m = 0, l$, в базисе линейный поляризаций можно представить как

$$|1, m\rangle = e^{im\varphi} \begin{pmatrix} 1 \\ i \end{pmatrix} F_m(r), \quad (3)$$

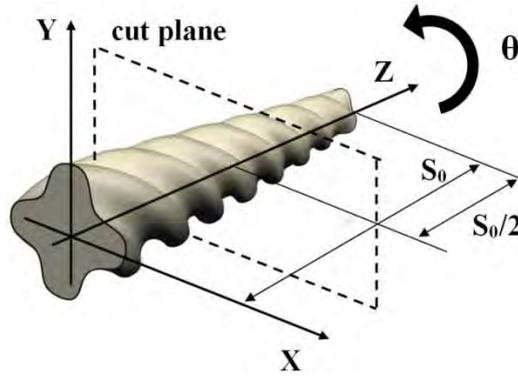


Рис. 1. Модель мультигеликоидального волокна ($l = 4$) с управляемым дефектом скрутки. МГВ с длиной S_0 разрезается в выделенной штрихованной линии плоскости, после чего отмеченная часть волокна поворачивается на угол θ так, как показано жирной стрелкой

Нужно отметить, что моды (2) должны быть дополнены двумя вихрями: назад бегущим ОВ $|1, l\rangle$ и вперёд бегущим ОВ $|1, -l\rangle$. Кроме того, в состав мод (2) не входят две бегущие назад связанные моды.

2. УПРАВЛЕНИЕ ОРБИТАЛЬНЫМ УГЛОВЫМ МОМЕНТОМ

Рассмотрим возбуждение МГВ с помощью ФМ $|1, 0\rangle$. Сшивая выражения для полей и их производные на границах $z = 0$, $z = S_0 / 2$ и $z = S_0$ можно записать выражение для прошедшего через МГВ с дефектом скрутки поля в безотражательном приближении:

$$|\Phi(z = s_0)\rangle = K_0 |1, 0\rangle + K_l |1, l\rangle, \quad (4)$$

где

$$K_0 = [C_1(AC_1 + BC_2)\exp(iz_0\bar{\beta}) + C_2(AC_2 - BC_1)\exp(-iz_0\bar{\beta})] \exp[il(qz_0 + \theta)],$$

$$K_l = C_2(AC_1 + BC_2)\exp(iz_0\bar{\beta}) + C_1(BC_1 - AC_2)\exp(-iz_0\bar{\beta}) \quad (5)$$

и

$$A = \exp(-il\theta) \left\{ \cos \frac{s_0\bar{\beta}}{2} + i \frac{l\varepsilon}{2\bar{\beta}} \sin \frac{s_0\bar{\beta}}{2} \right\}, B = \frac{iQ}{2\bar{\beta}} \sin \frac{s_0\bar{\beta}}{2}. \quad (6)$$

Здесь используются следующие обозначения: $\theta = \theta + \bar{\theta}$, $\bar{\theta} = q_0 s_0 / 2$, $z_0 = s_0 / 2$.

Нужно отметить, что $|K_0|^2 + |K_l|^2 = 1$, так как должен выполняться закон сохранения энергии. Кроме того, мы положили $\lambda = \lambda_0$, т.е. $q = q_0$.

Непосредственная подстановка поля (4) в формулу Бэрри для исчисления ОУМ [17] позволяет получить:

$$L_z = \frac{l}{\omega} |K_l|^2, \quad (7)$$

где ω – частота излучения.

Зависимость L_z от угла дефекта скрутки θ при $\varepsilon = 0$ показана на Рис. 2. График для L_z на Рис. 2 имеет 4 пика, количество которых соответствует порядку вращательной симметрии распределения показателя преломления волокна (в приведённом примере $l = 4$). На Рис. 3. приведён график зависимости L_z от длины волны при определённых значениях угла дефекта θ .

Можно установить, что поле (4) представлено l сингулярностями с единичной силой. Действительно, положение нулей (сингулярностей волнового фронта) в этом поле определяется уравнением $\text{Re}\Phi = \text{Im}\Phi = 0$, которое позволяет получить систему уравнений, решение которой определяет положение (r, φ) сингулярности в поперечном сечении поля:

$$\begin{aligned} |K_0|F_0(r) + |K_l|F_l(r) \cos(l\varphi + \arg K_l - \arg K_0) &= 0, \\ \sin(l\varphi + \arg K_l - \arg K_0) &= 0. \end{aligned} \quad (8)$$

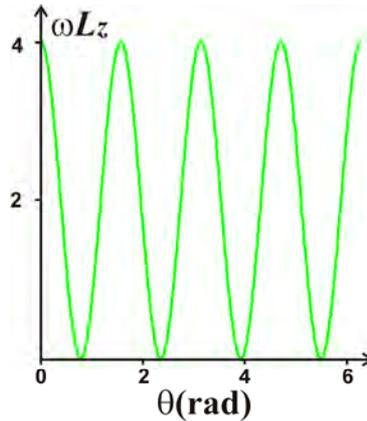


Рис. 2. Зависимость ОУМ выходящего поля от угла дефекта скрутки θ при нулевой расстройке $\varepsilon = 0$. Параметры волокна: $n_{co} = 1.5$, $\Delta = 0.01$, $\delta = 0.05$, радиус сердцевины волокна $r_0 = 10\lambda_0$, $\lambda_0 = 632.8$ нм, $q = 9355.1797$ м⁻¹, $S_0 = 2.57$ мм, $l = 4$. Наличие четырёх пиков связано с четырёхкратной вращательной симметрией распределения показателя преломления

Выражение (8) позволяет заключить, что в выходящем поле существует l нулей, которые равноотстоят от центра. Расстояние между центрами ОБ с единичным ТЗ растёт при увеличении $|K_0|$ – относительной доли ФМ. Данная базовая нестабильность ОБ высших порядков является хорошо установленным фактом [18], о котором до сих пор упоминают в современных исследованиях [19, 20].

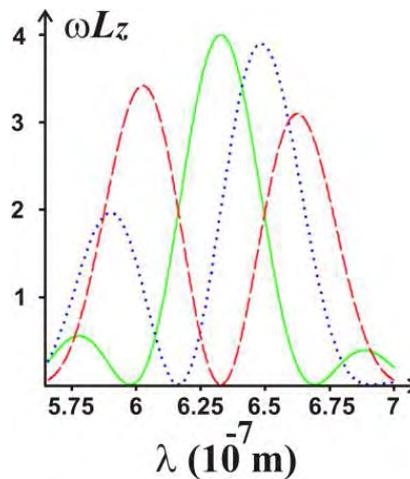


Рис. 3. Зависимость ОУМ выходящего поля от длины волны излучения при определённых значениях угла дефекта скрутки θ : 0 (зелёная сплошная кривая); $\pi/8$ (синяя точечная кривая); $\pi/4$ (красная штрихованная линия)

Несмотря на распад первоначального ОВ $|1,l\rangle$ на l ОВ $|1,1\rangle$, закодированная в исходном ОВ информация может быть восстановлена на основе суперпозиции единичных ОВ с помощью известной техники модовой демультимплексации [21].

Существенно меняющейся величиной у выходящего пучка является его полный ОУМ. С математической точки зрения изменение ОУМ не требует никаких пояснений, однако с точки зрения физики стоит рассмотреть данную ситуацию качественно. Наложение на ОВ $|1,l\rangle$ поля фундаментальной моды $|1,0\rangle$ приводит к распаду исходного ОВ на l вихрей с единичным ТЗ, которые отстоят друг от друга на некотором расстоянии (Рис. 4).

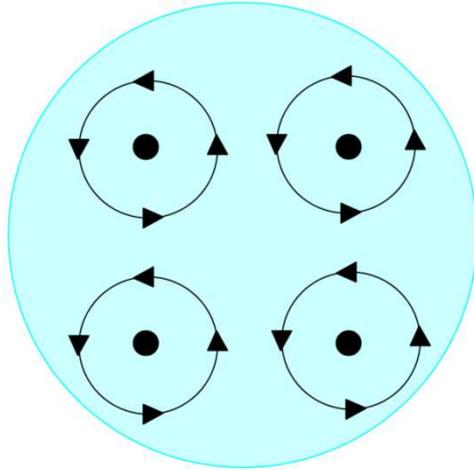


Рис. 4. Схематическая иллюстрация расщепления ОВ высшего порядка $|1,l\rangle$ ($l=4$) на l ОВ с единичными зарядами. Положение сингулярностей показано чёрными точками, а поперечный ток энергии – кружками со стрелками

Наличие ОУМ у ОВ обуславливается циркуляцией потока вектора Пойнтинга (кружки со стрелками) вокруг точки сингулярности (чёрные точки). Для уединённого ОВ отдельные потоки вносят вклад в полный ОУМ вихря. Однако в присутствии возмущающего поля ОВ $|1,l\rangle$ распадается на l единичных и пространственно разделённых вихрей. Как видно из Рис. 4, в данном случае в пространстве появляются области, в которых потоки энергии единичных вихрей направлены противоположно и компенсируют друг друга. Очевидно, что при увеличении расстояния между ОВ вклад областей с малым ОУМ в общий ОУМ исходного вихря становится преобладающим, поэтому общий ОУМ выходящего поля уменьшается. Данное качественное пояснение может быть изложено и на языке математики. Используя технику, подобную технике, которая позволила получить выражение (25) в [22], можно записать для нашего случая выражение для усреднённого по времени ОУМ, отнесённого к мощности поля $E = E_0 A e^{i\chi}$:

$$\frac{\langle m_z \rangle}{N} = \frac{1}{\omega c} A^2 \frac{\partial \chi}{\partial \varphi}, \quad (9)$$

где A – действительная безразмерная амплитуда, χ – фаза, и c – скорость света. Для поля (4) формула (9) позволяет записать

$$\frac{\omega c}{N} \langle m_z \rangle = l \left[\cos^2 \frac{l\theta}{2} F_l^2(r) - \frac{1}{2} \sin l\theta \cos l\varphi F_0(r) F_l(r) \right], \quad (10)$$

где необходимо использовать нормированные радиальные функции: $F_l \rightarrow F_l / \sqrt{N_l}$. Очевидно, что при угле дефекта скрутки $\theta = 0$ (дефект отсутствует): $\frac{\omega c}{N} \langle m_z \rangle = l F_l^2(r)$. В обратном случае ($\theta = \pi / l$) наблюдается отсутствия вихря: $\langle m_z \rangle = 0$. Распределение $\omega c \langle m_z \rangle / N$ при промежуточных значениях угла дефекта скрутки продемонстрировано на Рис. 5.

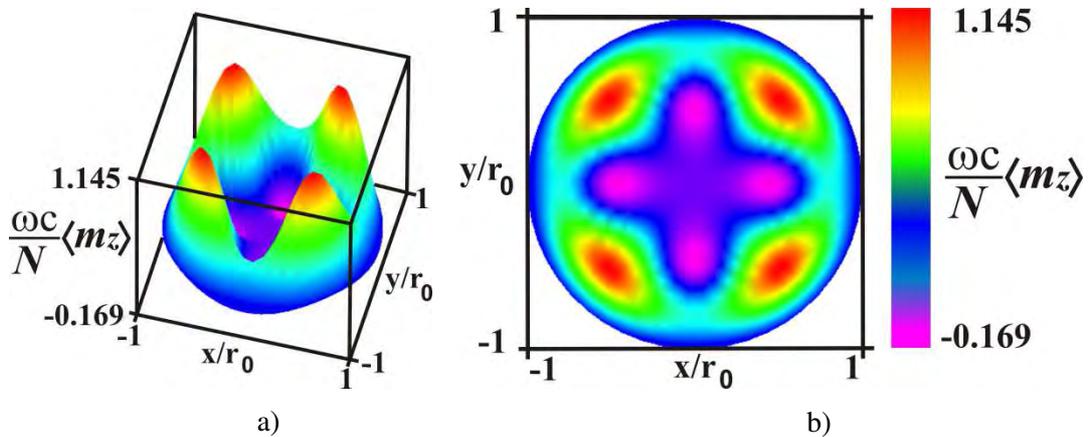


Рис. 5. Распределение усреднённой по времени плотности ОУМ $\langle m_z \rangle$ (в единицах $N / \omega c$) в поперечном сечении выходящего поля при промежуточном значении угла дефекта скрутки: $\theta = \pi / 5$; а) вид сбоку, б) нормальная проекция; r_0 – радиус сердцевинки волокна

Очевидно, что в центральной области поток ОУМ действительно имеет низкую плотность. Области с более высоким значением УМ находятся снаружи на окружности. Четырёхкратная симметрия распределения плотности ОУМ обусловлена аналогичной симметрией распределения показателя преломления.

В заключение, рассмотрим вопрос о радиационных потерях в данной системе. Существует две причины данных потерь. Первая из них связана со специальным типом волокна, которое используется для управления ОУМ в предложенной схеме. В некотором смысле рассмотренная выше волоконная система напоминает навитое

волокно (или, скорее, пучок волокон, навитых вокруг общей оси), в котором наличествуют обычные потери, связанные с изгибом волокна. Вопрос о данном типе потерь иногда рассматривается в литературе по ГВР. Кроме того, утверждение о существовании «изгибных» потерь в МГВ является спорным в силу того, что волновой вектор моды не меняет своего направления при распространении по волокну, что имеет место в обычных изогнутых или навитых волокнах. В любом случае, можно полагаться на оценку, выполненную Карташовым [23]: для волокна с геликоидальной сердцевиной при минимальной длине конверсии данные потери были менее 5%.

Второй причиной радиационных потерь является дефект скрутки. Если данный дефект не нарушает целостности волокна, единственная причина уменьшения доли передаваемой энергии может быть связана с френелевскими потерями, которые при отсутствии повреждений волокна будут пренебрежимо малы. Действительно, для обычных слабонаправляющих волокон контраст показателя преломления очень мал, поэтому волокно представляет собой почти однородную систему. Ситуация для реального случая существенно иная, когда волокно разделено на две половины дефектом скрутки. Френелевские потери на двух дополнительных границах могут в сумме достигать 8%. Данная цифра должна быть удвоена, чтобы учесть потери на входном и выходном концах волокна. В действительности, френелевские потери могут быть существенно ниже своих пиковых значений из-за интерференционных эффектов.

Существует способ, который позволит устранить указанный недостаток предложенной схемы. Действительно, рассмотрим её модификацию, в которой между двумя МГВ помещено идеальное волокно длины d . Модифицированная схема напоминает ту, которая используется при создании перестраиваемых режекторных фильтров [24]. Так как секция идеального волокна имеет длину d , то она вносит разницу фаз $D = ldq_0$ между ОВ $|1, l\rangle$ и ФМ $|1, 0\rangle$. При нулевой расстройке $\varepsilon = 0$, ОУМ выходящего поля будет

$$L_D = \frac{1}{\omega} \cos^2 \left(l \frac{\theta - dq_0}{2} \right). \quad (11)$$

Из формулы (11) следует, что кривая для ОУМ будет смещена вправо на величину dq_0 , однако, график для L_D всё равно будет иметь l пиков. Иными словами, добавление идеального волокна между МГВ не нарушит работоспособность рассмотренной вначале схемы.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В данной статье теоретически продемонстрировано, что создание управляемого дефекта скрутки в мультигеликоидальном волокне позволяет контролировать орбитальный угловой момент выходящего поля при неизменной мощности входящего поля. Данный факт продемонстрирован на примере прохождения гауссова пучка сквозь такое дефектное волокно. Установлено, что варьирование

угла дефекта скрутки позволяет изменять полный орбитальный угловой момент сгенерированного оптического поля в пределах от 0 до l (в безразмерных единицах) при использовании волокна с порядком вращательной симметрии, равном l . Также показано, что нестабильность оптического вихря высшего порядка приводит к уменьшению орбитального углового момента сгенерированного оптического поля. Кроме того, исследовано распределение плотности углового момента в поперечном сечении выходящего поля.

Список литературы

1. Rashleigh S. C. Origins and control of polarization effects in single-mode fibers // *J. Lightw. Technol.* 1983. Vol. 1. P. 312–331.
2. Ulrich R., Simon A. Polarization optics of twisted single-mode fibres // *Applied Optics.* 1979. Vol. 18. P. 2241–2251.
3. Kopp V. I., Genack A. Z. Chiral fibres : adding twist // *Nature Photonics.* 2011. Vol. 5. P. 470–472.
4. Chiral fiber gratings / V. I. Kopp, V. M. Churikov, J. Singer, N. Chao, D. Neugroschl, A. Z. Genack // *Science.* 2004. Vol. 305. P. 74–75.
5. Polarization properties of chiral fiber gratings / G. Shvets, S. Trendafilov, V. I. Kopp, D. Neugroschl, A. Z. Genack // *Journal of Optics A : Pure and Applied Optics.* 2009. Vol. 11. P. 074007.
6. Kopp V. I., Genack A. Z. Double-helix chiral fibers // *Opt. Lett.* 2003. Vol. 28. P. 1876–1878.
7. Single- and double-helix chiral fiber sensors / V. I. Kopp, V. M. Churikov, G. Zhang, J. Singer, C. W. Draper, N. Chao, D. Neugroschl, A. Z. Genack // *J. Opt. Soc. Am. B.* 2007. Vol. 24. P. 48.
8. Poole C. D., Townsend C. D., Nelson K. T. Helical-grating two-mode fiber spatial-mode coupler // *Journal of Lightwave Technology.* 1991. Vol. 9. P. 598–604.
9. Lee K. S., Erdogan T. Fiber mode conversion with tilted gratings in an optical fiber // *J Opt Soc Am A Opt Image Sci Vis.* 2001. Vol. 18. No. 5. P. 1176–85.
10. Nye J. F., Berry M. V. Dislocations in Wave Trains // *Proc. R. Soc. Lond. A.* 1974. Vol. 336. P. 165.
11. Alexeyev C. N., Lapin B. P., Yavorsky M. A. Helical core optical fibres maintaining propagation of a solitary optical vortex // *Phys. Rev. A.* 2008. Vol. 78. P. 013813.
12. Alexeyev C. N., Yavorsky M. A. Generation and conversion of optical vortices in long-period helical core optical fibers // *Phys. Rev. A.* 2008. Vol. 78. P. 043828.
13. Generation of optical vortices in layered helical waveguides / C. N. Alexeyev, T. A. Fadeyeva, B. P. Lapin, M. A. Yavorsky // *Phys. Rev. A.* 2011. Vol. 83. P. 063820.
14. Alexeyev C. N. Narrowband reflective generation of higher-order optical vortices in Bragg spun optical fibers // *Appl Opt.* 2013. Vol. 52. № 3. P. 433–8.
15. Alexeyev C. N., Lapin B. P., Yavorsky M. A. Generation of optical vortices in multihelical optical fibers // *Optics and Spectroscopy.* 2013. Vol. 114. P. 849–854.
16. Snyder A. W., Love J. D. *Optical Waveguide Theory.* London, New York : Chapman and Hall, 1985.
17. Berry M. V. Paraxial beams of spinning light // *Proc. SPIE.* 1998. Vol. 3487. P. 6–11.
18. Courtial J., Padjett M. Performance of a cylindrical lens mode converter for producing Laguerre-Gaussian laser modes // *Opt. Commun.* 1999. Vol. 159. P. 13–18.
19. Ricci F., Löffler W., van Exter M. P. Instability of higher-order optical vortices analyzed with a multipinhole interferometer // *Opt. Express.* 2012. Vol. 20. P. 22961–22975.
20. Dennis M. R., Götte J. B. Topological aberration of optical vortex beams: determining dielectric interfaces by optical singularity twists // *Phys. Rev. Lett.* 2012. Vol. 109. P. 183903.
21. Measuring orbital angular momentum superpositions of light by mode transformation / G. C. G. Berkhout, M. P. J. Lavery, M. J. Padgett, M. W. Beijersbergen // *Opt. Lett.* 2011. Vol. 36. P. 1863–1865.
22. Alexeyev C. N., Volyar A. V., Yavorsky M. A. Linear azimuthons in circular fibre arrays and optical angular momentum of discrete optical vortices // *Phys. Rev. A.* 2009. Vol. 80. P. 063821.
23. Kartashov Y. V., Vysloukh V. A., Torner L. Dynamics of topological light states in spiraling structures // *Opt. Lett.* 2013. Vol. 38. P. 3414–3417.

24. Bandwidth-tunable band-rejection filter based on helicoidal fiber grating pair of opposite helicities / W. Shin, B. A. Yu, Y. C. Noh, J. Lee, D. K. Ko, K. Oh // *Opt. Let.* 2007. Vol. 32. P. 1214–1216.

ORBITAL ANGULAR MOMENTUM CONTROL BY A MULTIHHELICOIDAL FIBER WITH A TWIST DEFECT

Alexeyev C. N., Lapin B. P., Yavorsky M. A.*

Institute of Physics and Technology, V. I. Vernadsky Crimean Federal University, Simferopol, 295007, Russia

**E-mail: lapinboris@gmail.com*

We have theoretically demonstrated that by creating a controllable twist defect in an l -helicoidal fibre one can control the orbital angular momentum of the generated beam at a constant power. We have studied the passage of the Gaussian beam through such a defect fibre and shown that by varying the twist defect angle one can change the total orbital angular momentum of the generated optical field from 0 to 1 (in dimensionless units). We have also studied the distribution of the angular momentum density in the cross-section of the generated optical field.

Key words: multihelical fiber, orbital angular momentum, orbital angular momentum control.

References

1. S. C. Rashleigh, Origins and control of polarization effects in single-mode fibers, *J. Lightw. Technol.* **1**, 312-331 (1983).
2. R. Ulrich, A. Simon, Polarization optics of twisted single-mode fibres, *Applied Optics* **18**, 2241–2251 (1979).
3. V. I. Kopp, A. Z. Genack, Chiral fibres: adding twist, *Nature Photonics* **5**, 470–472 (2011).
4. V. I. Kopp, V. M. Churikov, J. Singer, N. Chao, D. Neugroschl, A. Z. Genack, Chiral fiber gratings, *Science* **305**, 74–75 (2004).
5. G. Shvets, S. Trendafilov, V. I. Kopp, D. Neugroschl, A. Z. Genack, Polarization properties of chiral fiber gratings, *Journal of Optics A : Pure and Applied Optics* **11**, 074007 (2009).
6. V. I. Kopp, A. Z. Genack, Double-helix chiral fibers, *Opt. Let.* **28**, 1876–1878 (2003).
7. V. I. Kopp, V. M. Churikov, G. Zhang, J. Singer, C. W. Draper, N. Chao, D. Neugroschl, A. Z. Genack, Single- and double-helix chiral fiber sensors, *J. Opt. Soc. Am. B.* **24**, 48 (2007).
8. C. D. Poole, C. D. Townsend, K. T. Nelson, Helical-grating two-mode fiber spatial-mode coupler, *Journal of Lightwave Technology* **9**, 598–604 (1991).
9. K. S. Lee, T. Erdogan, Fiber mode conversion with tilted gratings in an optical fiber, *J Opt Soc Am A Opt Image Sci Vis.* **18**(5), 1176-85 (2001).
10. J. F. Nye, M. V. Berry, Dislocations in Wave Trains, *Proc. R. Soc. Lond. A.* **336**, 165 (1974).
11. C. N. Alexeyev, B. P. Lapin, M. A. Yavorsky, Helical core optical fibres maintaining propagation of a solitary optical vortex, *Phys. Rev. A* **78**, 013813 (2008).
12. C. N. Alexeyev, M. A. Yavorsky, Generation and conversion of optical vortices in long-period helical core optical fibers, *Phys. Rev. A* **78**, 043828 (2008).
13. C. N. Alexeyev, T. A. Fadeyeva, B. P. Lapin, M. A. Yavorsky, Generation of optical vortices in layered helical waveguides, *Phys. Rev. A* **83**, 063820 (2011).
14. C. N. Alexeyev, Narrowband reflective generation of higher-order optical vortices in Bragg spun optical fibers, *Appl Opt.* **52**(3), 433-8 (2013).
15. C. N. Alexeyev, B. P. Lapin, M. A. Yavorsky, Generation of optical vortices in multihelical optical fibers, *Optics and Spectroscopy* **114**, 849–854 (2013).

16. A. W. Snyder, J. D. Love, *Optical Waveguide Theory* (Chapman and Hall : London, New York, 1985).
17. M. V. Berry, Paraxial beams of spinning light, *Proc. SPIE* **3487**, 6–11 (1998).
18. J. Courtial, M. Padjett, Performance of a cylindrical lens mode converter for producing Laguerre-Gaussian laser modes, *Opt. Commun.* **159**, 13–18 (1999).
19. F. Ricci, W. Löffler, M. P. van Exter, Instability of higher-order optical vortices analyzed with a multi-pinhole interferometer, *Opt. Express* **20**, 22961–22975 (2012).
20. M. R. Dennis, J. B. Götte, Topological aberration of optical vortex beams : determining dielectric interfaces by optical singularity twists, *Phys. Rev. Lett.* **109**, 183903 (2012).
21. G. C. G. Berkhout, M. P. J. Lavery, M. J. Padgett, M. W. Beijersbergen, Measuring orbital angular momentum superpositions of light by mode transformation, *Opt. Lett.* **36**, 1863–1865 (2011).
22. C. N. Alexeyev, A. V. Volyar, M. A. Yavorsky, Linear azimuthons in circular fibre arrays and optical angular momentum of discrete optical vortices, *Phys. Rev. A* **80**, 063821 (2009).
23. Y. V. Kartashov, V. A. Vysloukh, L. Torner, Dynamics of topological light states in spiraling structures, *Opt. Lett.* **38**, 3414–3417 (2013).
24. W. Shin, B. A. Yu, Y. C. Noh, J. Lee, D. K. Ko, K. Oh, Bandwidth-tunable band-rejection filter based on helicoidal fiber grating pair of opposite helicities, *Opt. Lett.* **32**, 1214–1216 (2007).

*Поступила в редакцию 01.11.2017 г. Принята к публикации 22.12.2017 г.
Received November 01, 2017. Accepted for publication December 22, 2017*

ТЕХНИКА, ИНФОРМАТИКА И УПРАВЛЕНИЕ

TECHNICS, COMPUTER SCIENCE AND MANAGEMENT

Вестник Физико-технического института

Крымского федерального университета имени В. И. Вернадского

Том 1 (67–69). № 4. 2017. С. 47–62

Journal of Physics and Technology Institute of V. I. Vernadsky Crimean Federal University

Volume 1 (67–69). No. 4. 2017. P. 47–62

УДК 621.3.045.12

СИНТЕЗ ПРОСТЕЙШИХ СИСТЕМ, СОЗДАЮЩИХ ОДНОРОДНОЕ МАГНИТНОЕ ПОЛЕ

Клевец Н. И.

*Академия биоресурсов и природопользования, Крымский федеральный университет имени
В. И. Вернадского, Симферополь 295492, Россия*

E-mail: pmsolution@mail.ru

В работе рассмотрены простейшие маловитковые токопроводящие системы, состоящие из круговых витков. Системы синтезированы интегральным методом. Показано, что создание высоко однородного поля во внутренней рабочей области токопроводящих систем, состоящих из малого числа круговых витков, невозможно. Найдены размеры рабочих областей и отношений токов в системах, при которых поле отличается от однородного не более, чем на 1%. Описана методика и приведен пример сравнения различных токопроводящих систем по многим критериям.

Ключевые слова: магнитное поле, токопроводящая система, система Гельмгольца, система Баркера, система Браунбека, система Гаррета, система Максвелла, синтез, многокритериальное ранжирование альтернатив.

PACS: 41.20.Gz

ВВЕДЕНИЕ

Однородные магнитные поля широко используются в научных исследованиях, измерительных приборах и большом количестве технических устройств. По-видимому, первой токопроводящей системой (ТПС), создающей однородное магнитное поле (ОМП), была хорошо известная система Гельмгольца (СГ), состоящая из двух соосных проводников (катушек) в виде окружностей, по которым текут одинаковые токи. В связи с тем, что к системам, создающим ОМП, предъявляются различные дополнительные требования СГ подвергалась усовершенствованию на протяжении уже более 150 лет с момента ее изобретения¹. В настоящее время известно много ТПС, создающих постоянное поле на оси вблизи центра [1-6]. Наиболее полное исследование таких систем выполнено Гарретом [3]. Маловитковые системы исследовались исключительно с использованием метода локального синтеза (см. п.1). При этом степень однородности их поля в объеме ТПС исследована недостаточно полно, так как локальный синтез не ориентирован на такие исследования. Однако исследование области однородности поля в рабочем объеме ТПС имеет важное практическое значение, в связи с чем тема статьи является актуальной и в настоящее время [7]. Здесь рассмотрены некоторые

¹ Гельмгольц Г. Доклад на заседании физического общества. Берлин. 16 марта 1849 г.

простейшие маловитковые ТПС; выполнен их синтез, с использованием интегрального метода, и сравнительный анализ по многим критериям.

Цель исследования – синтез ТПС с малым числом витков, создающих ОМП в объеме рабочей области системы (РОС) и их сравнительный анализ.

1. ПОДХОДЫ К ПРОЕКТИРОВАНИЮ ТОКОПРОВОДЯЩИХ СИСТЕМ, СОЗДАЮЩИХ ОДНОРОДНОЕ ПОЛЕ

В практике проектирования ТПС, создающих ОМП, широкое распространение получили два метода синтеза: локальный и интегральный [1–6]. *Локальный метод синтеза* представляет собой процедуру разложения поля пары симметричных витков с одинаковым током в ряд Тейлора в цилиндрической системе координат. При этом разложение поля выполняется в геометрическом центре ТПС. Затем, решая системы алгебраических уравнений, подбирают геометрические параметры и токи в витках системы таким образом, чтобы исключить несколько первых членов ряда. Это обеспечивает высокую степень постоянства поля ТПС на ее продольной оси вблизи центра системы (на оси поле имеет только аксиальную компоненту). Этот метод весьма прост в реализации и для маловитковых систем может быть выполнен без использования ЭВМ. Отметим, что вследствие симметричного расположения витков с одинаковыми токами относительно плоскости симметрии $z=0$, в этой плоскости поле имеет лишь одну аксиальную компоненту, практически постоянную в круге малого радиуса с центром, совпадающим с центром ТПС. Таким образом, при локальном синтезе ТПС предполагается, что поле системы однородно в шаре малого радиуса, расположенного в центре системы, однако это выполняется с хорошей точностью для весьма малых относительных объемов РОС².

Интегральный метод синтеза (ИМС) ТПС представляет собой процедуру разложения заданного векторного поля по ортонормированному базису, функции которого представляют собой поля витков с единичными токами. При этом требуемое поле задают в объеме РОС. В дальнейшем мы будем задавать только однородное поле, описываемое выражением $\mathbf{B}_0 = B_0 \mathbf{k}$, где B_0 – величина поля в центре системы, \mathbf{k} – единичный вектор, направленный вдоль оси системы. Применение ИМС позволяет найти соотношение токов в витках системы, при котором критерий оценки погрешности воспроизведения поля в РОС достигает минимального значения. Как правило, в качестве указанного критерия принимают относительное среднеквадратичное отклонение поля от требуемого в РОС. Исходными данными для ИМС являются количество, размеры и координаты витков с током, размеры РОС и закон распределения поля в ней. Кроме того, для расчетов необходимо указать количество точек РОС, в которых будет задано поле. Отметим, что при использовании ИМС требуемое поле часто задают на оси системы [1–6]. При этом получают поля с очень высокой "однородностью". В действительности

² В действительности поле имеет высокую степень однородности в малом эллипсоиде, вытянутом вдоль оси системы.

РОС всегда имеет некоторый объем (желательно максимально большой), поэтому задавать требуемое поле и оценивать точность его воспроизведения необходимо в объеме РОС. Для синтеза систем, создающих однородное поле в объеме РОС, подходит только ИМС, которым мы и воспользуемся ниже.

2. РАСЧЕТ ПОЛЯ СИСТЕМЫ КРУГОВЫХ ТОКОВ

Все, рассматриваемые ниже, ТПС представляют собой совокупность круговых витков с током. В связи с этим приведем формулы для расчета поля кругового витка с током в цилиндрической системе координат, ось аппликат которой перпендикулярна плоскости витка [8]:

$$B_r(r, z) = \frac{\mu_0 I (z - z_0)}{2\pi\rho \left[(z - z_0)^2 + (r + \rho)^2 \right]^{1/2}} \left[-K + \frac{(z - z_0)^2 + r^2 + \rho^2}{(z - z_0)^2 + (r - \rho)^2} E \right], \quad (1)$$

$$B_z(r, z) = \frac{\mu_0 I}{2\pi \left[(z - z_0)^2 + (r + \rho)^2 \right]^{1/2}} \left[K + \frac{r^2 - \rho^2 - (z - z_0)^2}{(z - z_0)^2 + (r - \rho)^2} E \right], \quad (2)$$

где μ_0 – магнитная постоянная, I – величина тока в витке, r, z_0 – радиус витка с током и координата его центра, ρ, z – координаты точки наблюдения поля,

$K(k) = \int_0^{\pi/2} d\beta / \sqrt{1 - k^2 \sin^2 \beta}$ – полный эллиптический интеграл первого рода,

$E(k) = \int_0^{\pi/2} \sqrt{1 - k^2 \sin^2 \beta} d\beta$ – полный эллиптический интеграл второго рода,

$k = \sqrt{4r\rho / [(z - z_0)^2 + (r + \rho)^2]}$ – модуль эллиптических интегралов.

В качестве РОС выберем цилиндр с высотой равной его диаметру (рис. 1). Однородное поле будем задавать в объеме РОС. Во всех рассматриваемых здесь случаях будем требовать, чтобы в РОС поле имело только одну постоянную по величине аксиальную компоненту $B_z = const$. Радиальная компонента поля должна быть равна нулю во всей РОС.

Можно показать [1–7], что в центре РОС, рассматриваемых здесь ТПС, поле "практически однородно" при определенных геометрических параметрах и соотношениях токов в проводниках. Однако во многих важных случаях поле должно быть однородно с высокой степенью точности в максимально большом объеме системы. Поэтому мы и рассматриваем РОС в виде цилиндра, показанного на рис. 1.

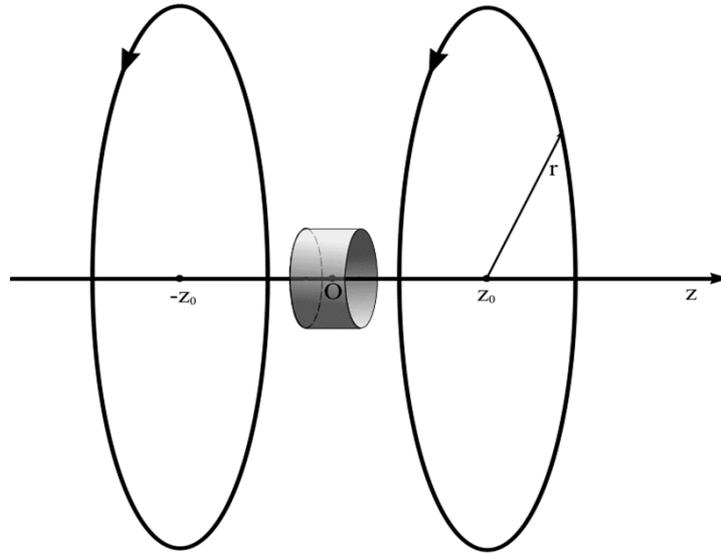


Рис. 1. Система Гельмгольца

Степень отклонения поля в РОС от однородного будем оценивать по величине его относительного среднеквадратичного отклонения (СКО) от заданного значения:

$$\Delta = \|\mathbf{B} - \mathbf{B}_0\| / \|\mathbf{B}_0\|, \quad (3)$$

где вертикальные линии обозначают Евклидову норму вектора в РОС, \mathbf{B} – поле системы, \mathbf{B}_0 – требуемое поле в РОС.

Отметим, что в [1–5, 7] для оценки качества поля, создаваемого системой, используют меру относительного отклонения поля от константы на оси системы:

$$\delta(z) = [B_0 - B(z)]/B_0, \quad (4)$$

где B_0 – поле в центре РОС, $B(z)$ – поле в точке наблюдения, расположенной на оси системы. Оценка (4) является менее жесткой, чем оценка (3), так как вычисляется только для точек, расположенных на оси системы.

В таблице 1 приведены оптимальные параметры 3х- и 4х-витковых систем, часто используемых на практике. Для всех систем индекс 1 относится к виткам ближайшим к плоскости симметрии систем, индекс 2 – к удаленным от плоскости симметрии виткам; N – число витков в системе, h – высота РОС, D_1 – диаметр витка, B_0 – поле в геометрическом центре системы при $I_1 = 1$ А, P – коэффициент потребляемой мощности системы.

В 3х-витковых системах Максвелла и Баркера первый виток лежит в плоскости симметрии системы, два других расположены симметрично относительно этой плоскости на расстоянии z_2 . Все 4х-витковые системы состоят из двух пар соосных витков, расположенных симметрично относительно плоскости $z = 0$.

Оптимальные параметры систем получены методом локального синтеза и взяты из указанных источников³. Приведенная в табл. 1 высота РОС соответствует относительному СКО поля от однородного приблизительно равному 1%. Поле в центре системы рассчитано для оптимального отношения токов, показанного в табл. 1, и $R_1 = 0,05$ м. Коэффициент потребляемой мощности рассчитан по формуле:

$$P = \sum_{n=1}^N I_n^2 R_n, \quad (5)$$

где I – ток в витке, R_n – радиус витка. Здесь предполагается, что витки систем выполнены из провода с одинаковыми физическими свойствами. В этом случае электрическое сопротивление витков будет прямо пропорционально их радиусам (удельное сопротивление материала и площадь сечения провода в формуле (5) не учитываются).

Таблица 1. Оптимальные параметры ТПС

Система	Оптимальные геометрические параметры систем	$\frac{I_2}{I_1}$	$\frac{h}{D_1}$	$B_0 \cdot 10^{-5}, T$	P, A ² ·м
1	2	3	4	5	6
Гельмгольца	$N = 2; z = 0,5R$	1,00	0,38	1,798	0,100
Максвелла	$N = 3; R_2 = \sqrt{4 / 7}R_1;$ $z_1 = 0; z_2 = \sqrt{3 / 4}R_1$	49/32	0,43	2,54	0,255
	$N = 4; R_2 = 0,672R_1;$ $z_1 = 0,298R_1; z_2 = 1,188R_2$	1,47	0,41	1,937	0,362
Баркера	$N = 3; R_2 = R_1;$ $z_1 = 0; z_2 = 0,760R_2$	1,88	0,55	3,644	0,454
	$N = 4; R_2 = R_1;$ $z_1 = 0,243R_1; z_2 = 0,941R_2$	2,26	0,65	4,501	0,611
Браунбека	$N = 4; R_2 = 0,764R_1;$ $z_1 = 0,278R_1; z_2 = 0,846R_1$	1,00	0,57	3,295	0,176
Гаррета	$N = 4; R_2 = 0,265R_1;$ $z_1 = 0,435R_1; z_2 = z_1$	0,02	0,39	1,971	0,100

Рассчитано автором с использованием данных [2, 3, 5].

³ В [5] для 3х-проводной системы Баркера приведено ошибочное значение отношения токов в два раза большее оптимального.

Как следует из данных табл. 1, максимальный объем РОС с приемлемым СКО поля от однородного имеет 4х-витковая система Баркера. Эта же система создает наибольшее поле в РОС, что является ее несомненным достоинством. При этом, в ней наблюдается наибольшее отличие токов в парах витков и максимальный коэффициент потребляемой мощности, что является ее существенным недостатком.

3. ИНТЕГРАЛЬНЫЙ СИНТЕЗ ТОКОПРОВОДЯЩИХ СИСТЕМ

Увеличить объем области однородности поля рассматриваемых систем можно путем корректировки отношения токов в парах проводников. Это можно сделать только с помощью интегрального синтеза систем. В данном пункте приведена методика определения соотношения токов в витках системы, обеспечивающего минимальное среднеквадратичное отклонение поля от требуемого распределения в РОС, а также результат ее применения к исследуемым системам.

Поле системы витков с током можно представить, как суперпозицию полей отдельных витков:

$$\sum_{n=1}^N I_n \cdot B_n = B_0, \quad (6)$$

где I_n – ток в n -м витке, N – количество витков в системе, B_n – поле n -го витка при единичном токе, рассчитанное по формулам (1), (2), B_0 – поле системы.

Если в (6) задать B_0 равным желаемому полю в РОС, то это равенство превратится в систему линейных алгебраических уравнений (СЛАУ) относительно неизвестных токов в проводниках. Поле системы следует вычислять с учетом симметрии расположения проводников и с учетом того, что в каждой симметричной паре проводников токи одинаковы по величине и направлению. Это означает, что СЛАУ для определения оптимального соотношения токов будет иметь только два столбца (и два неизвестных тока). При этом, она будет сильно переопределена, т.к. количество точек в РОС, в которых необходимо получить однородное поле, исчисляется несколькими десятками. Кроме того, для численного решения, СЛАУ (6) должна быть расписана покомпонентно, а это еще в два раза увеличивает количество ее строк.

Современные системы автоматических вычислений содержат встроенные функции для исследования и решения различных СЛАУ. Расчеты поля рассмотренных здесь систем выполнены в системе автоматизированных вычислений Mathcad. При этом СЛАУ решались методом сингулярного разложения с помощью встроенной функции `svd` [9].

Алгоритм расчета оптимального отношения токов в парах витков системы при фиксированных ее геометрических параметрах состоит из следующих шагов:

- 1) задать геометрические размеры колец системы;
- 2) задать геометрические размеры РОС;
- 3) рассчитать количество точек наблюдения поля в РОС и их координаты;
- 4) рассчитать компоненты поля каждой пары витков с одинаковыми токами в

- точках наблюдения поля по формулам (1), (2) и сформировать матрицу СЛАУ;
- 5) задать поле в точках наблюдения в виде $(B_z(r, z) = B_0; B_r(r, z) = 0)$, т.е. покомпонентно задать правую часть СЛАУ (6);
 - 6) решить СЛАУ относительно неизвестных токов и разделить полученные токи на величину тока в витках ближайших к центру системы (выразить токи в относительных единицах);
 - 7) рассчитать поле системы с нормированными токами в геометрическом центре системы и точках наблюдения;
 - 8) вычислить степень отклонения поля от однородного по формуле (3), в которой B_0 равно полю в центре системы.

Отметим, что после выполнения п. 6 приведенного алгоритма, токи в паре витков, расположенных ближе к плоскости симметрии системы, или витке, лежащем в плоскости симметрии, будут равны 1 А.

Для определения максимального размера РОС, в которой поле имеет желаемую степень однородности, расчеты по данному алгоритму должны многократно выполняться с п. 2. При вычислениях количество точек наблюдения поля подбиралось таким образом, чтобы размеры площадок, в центре которых они находились, приблизительно, были равны 1×1 мм.

В таблице 2 приведены результаты синтеза ТПС с помощью интегрального метода. В столбце 3 приведены относительные размеры высот РОС систем, при которых результаты синтеза систем обоими методами совпадают. Как следует из данных шестого столбца табл. 2, в данном случае совпадают и оптимальные отношения токов в парах витков. Исключение составляет 3х-витковая система Максвелла. Оптимальное отношение токов для этой системы, приведенное в [1, см. табл. 1], получается для РОС с отношением $h / D_1 = 0,568$. При этом погрешность воспроизведения поля в РОС равна 3,1 %.

Таблица 2. Оптимальные параметры ТПС, полученные методом интегрального синтеза

Система	Число витков	$\left(\frac{h}{D_1}\right)_0$	$\left(\frac{h}{D_1}\right)_{0,1}$	$\left(\frac{h}{D_1}\right)_1$	$\left(\frac{I_2}{I_1}\right)_0$	$\left(\frac{I_2}{I_1}\right)_{0,1}$	$\left(\frac{I_2}{I_1}\right)_1$
1	2	3	4	5	6	7	8
Максвелла	3	0,14	0,32	0,48	47/36	1,32	1,40
	4	0,12	0,42	0,56	0,682	0,68	0,66
Баркера	3	0,10	0,38	0,56	1,882	1,86	1,75
	4	0,20	0,49	0,66	2,260	2,25	2,19
Браунбека	4	0,34	0,44	0,59	1,000	0,96	0,93
Гаррета	4	0,16	0,30	0,39	0,025	0,02	0,02

Рассчитано автором

Отметим, что данные третьего и шестого столбцов табл. 2 описывают область системы с очень высокой однородностью поля (СКО порядка 0,001%).

В четвертом и пятом столбцах приведены относительные размеры РОС, при которых СКО поля систем от однородного не превышает 0,1% и 1%, соответственно. В седьмом и восьмом столбцах приведены оптимальные отношения токов в парах витков, соответствующие размерам РОС из столбцов 4 и 5.

Как следует из данных таблицы 2, с увеличением размеров РОС погрешность воспроизведения однородного поля увеличивается, а отношение токов уменьшается. Однако, в 3х-витковой системе Максвелла оптимальное отношение токов растет с ростом величины РОС. Анализ данных столбца 3 таблицы 2 позволяет сделать предположение, что 4х-витковые системы Баркера и Браунбека должны быть наиболее устойчивы к малым погрешностям изготовления, т.к. их рабочие области имеют наибольшие размеры. Относительно 3х-витковой системы Максвелла можно сделать вывод о том, что отношение токов равно $47/36 = 1,306$ также обеспечит большую устойчивость системы к погрешностям изготовления. Данное свойство отмеченных систем имеет важное практическое значение для систем, использующихся в метрологии и ЯМР-томографии.

Следует также обратить внимание на то, что в системе Баркера, состоящей из витков одинакового диаметра, токи в удаленных от центра системы витках существенно больше, чем во внутренних витках. Анализ оптимальных значений токов во внешних витках других 4х-проводных систем, дает основания предположить, что для создания однородного поля необходимо использовать многовитковые ТПС с уменьшающимися радиусами внешних витков (см. рис. 5). Это предположение строго обосновано в [10].

На рисунке 2 показано поле рассмотренных систем, на аксиальной оси. Расчеты поля выполнены для систем, имеющих радиус $R_1 = 0,05$ м. Токи в витках систем взяты из восьмого столбца таблицы 2. Нумерация графиков на рис. 2 соответствует нумерации ТПС сверху вниз из таблиц 1 и 3.

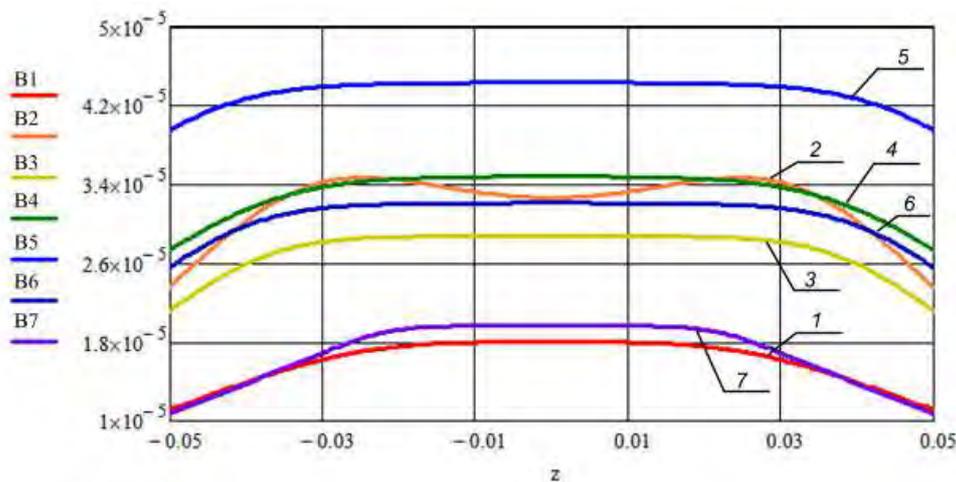


Рис. 2. Поле на продольной оси ТПС

Снижение величины индукции в центре 3х-проводной системы Максвелла (кривая 2) связано с тем, что эта система синтезирована по критерию (3), т. е. обеспечивалась однородность поля в объеме.

На рисунках 3–5 показаны силовые линии поля (левый рисунок) некоторых систем, а также карты линий уровня модуля магнитной индукции (правый рисунок). Большой пунктирный квадрат соответствует областям, в которых относительное СКО поля от однородного не превышает 1%. Малый квадрат соответствует областям, в которых поле отклоняется от однородного не более, чем на 0,001%. Соответствующее отношение токов в витках систем приведено в таблице 2.

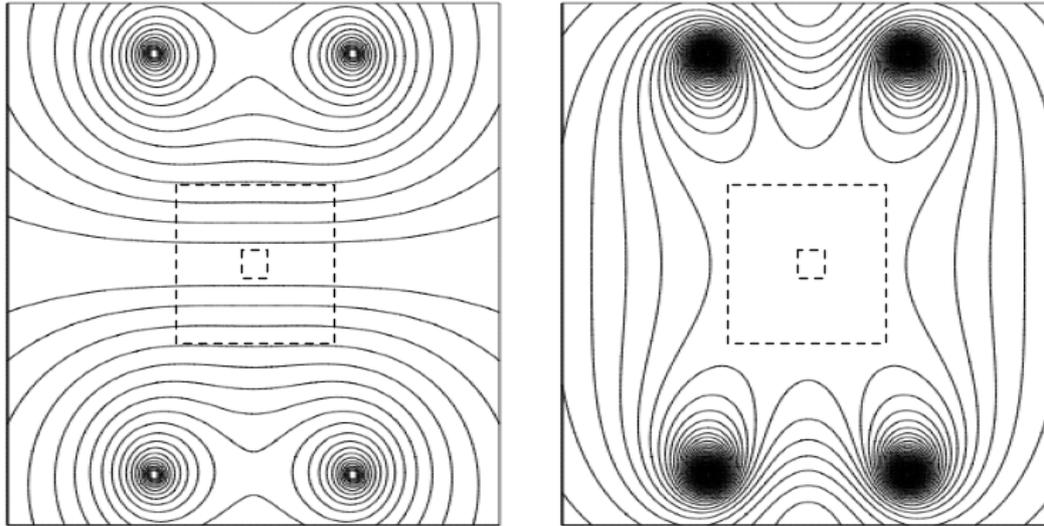


Рис. 3. Поле системы Гельмгольца

4. ОБУСЛОВЛЕННОСТЬ СЛАУ И СУЩЕСТВОВАНИЕ ТОЧНОГО РЕШЕНИЯ ЗАДАЧИ

Синтез ТПС относится к обратным задачам магнитостатики. Хорошо известно, что эти задачи некорректно поставлены по Адамару [6, 11, 12]. На практике это может проявляться в неустойчивости решения задачи к малым вариациям геометрических параметров системы. В нашем случае этот эффект отсутствует, т.к. все системы имеют малое число витков, которые, к тому же, значительно удалены друг от друга. В случае сведения задачи синтеза к решению СЛАУ, проверить корректность модели можно с помощью критерия единственности решения [13, с. 203], согласно которому СЛАУ имеет единственное решение, если ранг матрицы равен числу ее столбцов (неизвестных). При расчетах это условие проверялось с помощью встроенной функции `rank` системы Mathcad. При этом оно выполнялось для всех систем. В системе Mathcad также имеется встроенная функция для вычисления спектра матрицы (`svds`) и затем спектрального числа обусловленности.

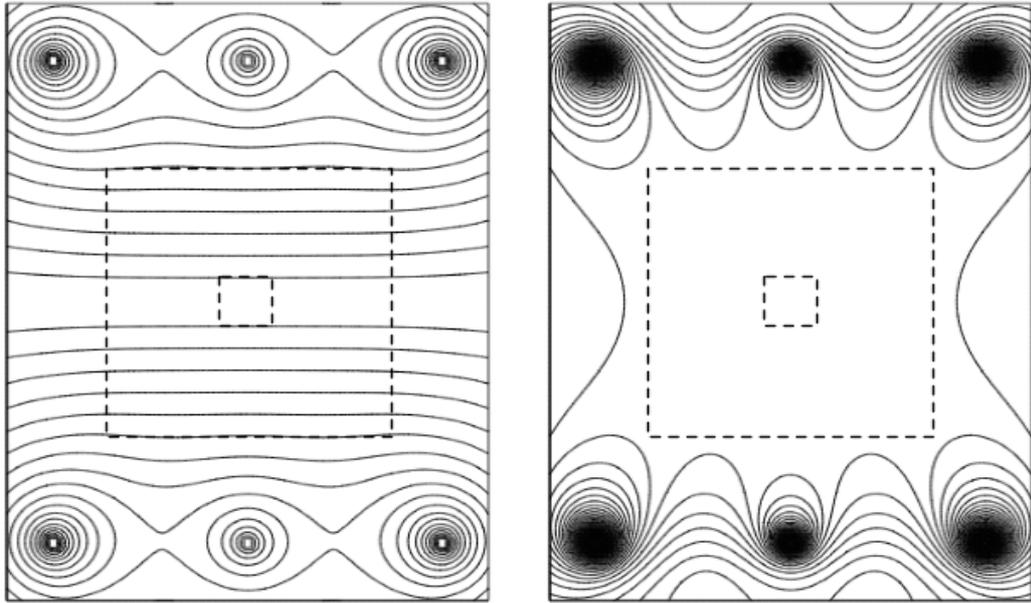


Рис. 4. Поле 3х-витковой системы Баркера

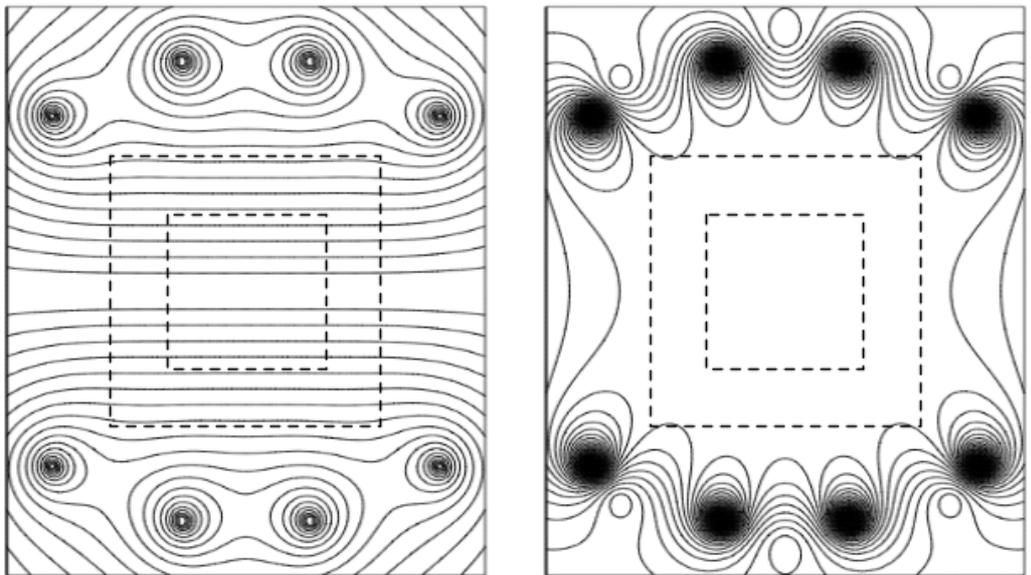


Рис. 5. Поле системы Браунбека

Проведенные исследования СЛАУ показали, что их число обусловленности не превосходит 100. Таким образом применение устойчивого к вычислительным погрешностям метода решения плохо обусловленных СЛАУ (svd) в нашем случае избыточно, однако удобно, т.к. подпрограмма svd решает переопределенные СЛАУ.

Вторая проблема, возникающая при решении задач синтеза, – корректное задание требуемого поля в РОС. Эта проблема возникает в связи с тем, что желаемое распределение поля в РОС (в нашем случае однородное) далеко не всегда может быть получено с помощью синтезируемой системы заданной геометрии. Для исследования вопроса существования решения СЛАУ можно воспользоваться теоремой Кронекера-Капели [13, с. 201], согласно которой, для существования решения СЛАУ ранг ее расширенной матрицы должен совпадать с рангом основной матрицы. К сожалению, в нашем случае это условие не выполняется ни для одной из рассмотренных систем ни при каких размерах РОС. Это означает, что с помощью рассмотренных ТПС невозможно даже теоретически создать абсолютно однородное поле в объемной рабочей области.

5. ИНТЕГРАЛЬНАЯ ОЦЕНКА СИСТЕМ

Выбор ТПС для практической реализации выполняют с использованием нескольких критериев, учитывающих технико-экономическую ситуацию и личные предпочтения лица, принимающего решения (ЛПР); в качестве последнего может выступать экспертный совет. В связи с этим приведем пример многокритериальной оценки рассматриваемых ТПС.

В настоящее время известно много различных методов многокритериального ранжирования альтернатив (МКРА). При правильном использовании все они должны давать приблизительно одинаковый результат. Ниже мы воспользуемся квалиметрическим методом [14].

Методика МКРА состоит из следующих этапов:

1. Выбор показателей для описания альтернатив (сравниваемых объектов).
2. Задание весовых коэффициентов показателей.
3. Определение типа показателей (стимуляторы, дестимуляторы).
4. Задание эталонных значений показателей в соответствии с их типом.
5. Задание значений показателей, при которых объект считается браком, т.е. не удовлетворяет базовым требованиям.
6. Оценка (измерение, расчет) показателей каждого объекта.
7. Приведение оценок показателей к сопоставимому виду.
8. Расчет интегрального показателя качества (ИПК) альтернатив.
9. Ранжирование альтернатив по убыванию (возрастанию) ИПК.
10. Содержательная интерпретация ранжированного ряда альтернатив.

Для сравнения альтернативных вариантов ТПС возьмем следующие критерии: число витков в системе, размер области однородности поля, отношение токов в витках, величину поля в центре системы, потребляемую мощность и технологичность конструкции изделия. Выбор показателей, используемых для МКРА, должен тщательно обосновываться [14]. Однако здесь мы не будем этого делать, а лишь отметим, что все они существенно влияют на технические параметры ТПС, а также стоимость их изготовления и эксплуатации.

Весовые коэффициенты показателей позволяют учесть технико-экономические условия и предпочтения ЛРП при ранжировании альтернатив по ИПК. Обычно их

задают в баллах, например, по 10-балльной шкале с последующей нормировкой их суммы на единицу по формуле:

$$w_i = w_i / \sum_{n=1}^N w_n, i = 1, \dots, N, \quad (7)$$

где w_n – ненормированное значение весового коэффициента n -го показателя, N – количество показателей, описывающих объект.

Показатели сравниваемых объектов, которые должны иметь максимально возможную (желаемую) величину называются стимуляторами. В нашем случае такими показателями являются: размер области однородности поля, величина поля в центре системы и технологичность конструкции изделия. Соответственно, дестимуляторами называются показатели, которые должны иметь минимально возможное значение, в нашем случае это: число витков в системе, отношение токов в витках и потребляемая мощность, которую мы оцениваем с помощью коэффициента потребляемой мощности P (см. табл. 1).

Эталонные значения показателей могут быть заданы экспертным методом. В нашем случае в качестве эталонных значений показателей целесообразно взять лучшие значения всех показателей, используемых при оценке ТПС.

Бракованные значения показателей также могут быть заданы экспертным методом, либо в качестве таковых могут быть взяты увеличенные, например, на 5% эталонные значения показателей-стимуляторов и уменьшенные на 5% эталонные значения показателей-дестимуляторов. В дальнейшем мы воспользуемся вторым способом задания эталонных значений показателей.

Технические показатели сравниваемых ТПС нами рассчитаны выше и представлены в табл. 1, 2. Для оценки технологичности конструкции изделий (ТКИ) необходимо разработать технологические карты изготовления ТПС. Здесь мы этого делать не будем, а выполним оценку ТКИ экспертным методом, принимая во внимание геометрические параметры систем и отношение токов в витках. Оценка ТКИ выразим в баллах по 10-балльной шкале. При этом воспользуемся только нечетными числами, как рекомендовано в [15] для увеличения "разрешения" оценок ТПС.

Приведение оценок показателей к сопоставимому виду (нормировка на единицу вектора показателя) является одним из этапов МКРА, который порождает большое разнообразие методов. Здесь мы воспользуемся методом, предложенным в [14]. При этом показатели-стимуляторы должны быть преобразованы путем расчета относительных разностей по формуле:

$$a_{ij} = \frac{a_{ij} - B_i}{E_i - B_i}, \quad (8)$$

а показатели-дестимуляторы – по формуле:

$$a_{ij} = \frac{B_i - a_{ij}}{B_i - E_i}; \quad (9)$$

где E_i – эталонное значение i -го показателя; B_i – бракованное значение i -го показателя.

Расчет ИПК альтернатив также может быть выполнен многими способами, мы воспользуемся мерой сходства объектов с эталоном в виде взвешенного среднего показателей объекта:

$$Q = \sum_{n=1}^N w_n \cdot q_n, \quad (10)$$

В (10) весовые коэффициенты w_n должны быть нормированы на единицу, а показатели объекта q_n – приведены к сопоставимому виду по одной из формул (8) – (9), в соответствии с типом показателя. Для наглядности ИПК, полученные по формуле (10), целесообразно выразит в относительных единицах.

Данные, необходимые для вычисления ИПК исследуемых ТПС, в соответствии с описанной методикой, приведены в таблице 3. В таблице показатели-стимуляторы имеют тип, обозначенный "1", а дестимуляторы – "0".

Таблица 3. Данные для расчета ИПК

№	Система	Число витков	h/D_1	I_2/I_1	$B_0 \cdot 10^{-5}, T$	$P, A^2 \cdot m$	ТКИ	ИПК
1	Гельмгольца	2	0,38	1,00	1,798	0,100	9	0,99
2	Максвелла	3	0,48	1,40	3,192	0,198	5	0,74
3		4	0,56	0,66	2,874	0,129	3	0,33
4	Баркера	3	0,56	1,75	3,479	0,357	9	0,92
5		4	0,66	2,19	4,431	0,579	7	0,82
6	Браунбека	4	0,60	0,97	3,209	0,172	7	1
7	Гаррета	4	0,39	0,02	1,967	0,100	7	0,63
Тип показателя		0	1	0	1	0	1	
Вес		7	9	5	7	7	9	

Рассчитано автором

В последнем столбце табл. 3 приведены ИПК рассматриваемых ТПС, рассчитанные по описанной выше методике. Столбчатая диаграмма ИПК показана на рис. 6. На оси абсцисс указаны номера рассмотренных ТПС, на оси ординат – относительные значения их ИПК. Как видим, по уровню ИПК исследуемые ТПС расположились в следующем порядке: система Браунбека, система Гельмгольца, 3х-проводная система Баркера. Поле этих систем показано на рисунках 3-5. Отметим,

что в реальных условиях оценки технологичности систем и весовые коэффициенты показателей могут быть другими, что приведет к другим значениям ИПК.

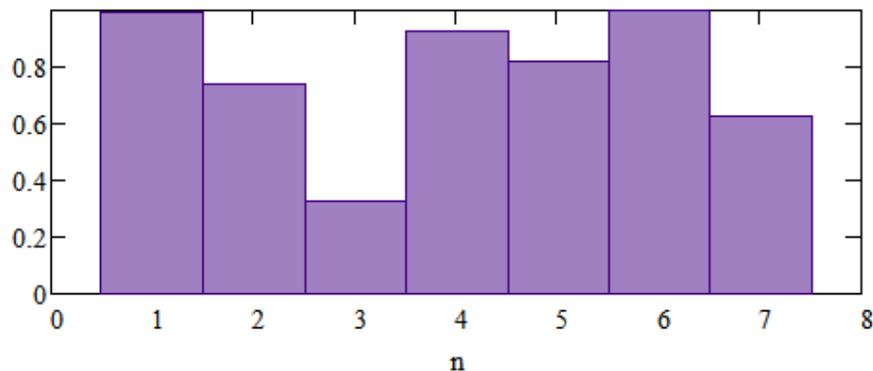


Рис. 6. Интегральные показатели качества ТПС

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенные исследования показали, что классические маловитковые ТПС, рассчитанные методом локального синтеза, создают однородное поле с погрешностью менее 1% в сравнительно малых объемах. Использование интегрального синтеза позволяет скорректировать оптимальное соотношение токов в витках систем и несколько увеличить область однородности поля. Наибольшую рабочую область в виде цилиндра с высотой равной диаметру имеет 4х-витковая система Баркера, наименьшую – 2х-витковая система Гельмгольца. Анализ СЛАУ, являющихся математическими моделями ТПС, показал, что создать однородное поле в объеме с помощью маловитковых систем невозможно.

В связи с тем, что при практической реализации ТПС необходимо учитывать несколько технико-экономических и технологических показателей, для окончательного выбора системы целесообразно использовать многокритериальные методы ранжирования альтернатив. Проведенные исследования показали, что простейшая 2х-витковая система Гельмгольца, имеющая относительно малую область однородности поля, выгодно отличается по другим показателям, что делает ее наиболее распространенной на практике в случае рабочих областей малых размеров.

В настоящее время известно много различных ТПС, предназначенных для создания ОМП в рабочей области. Большинство из них спроектировано для рабочей области, совпадающей с осью системы. При этом степень однородности поля в объеме РОС не исследуется. Известны также ТПС, создающие ОМП в рабочем объеме, но имеющие низкую технологичность конструкции, в связи с чем целесообразно попытаться упростить конструкцию таких систем без ущерба для однородности поля. Еще один слабо изученный вопрос касается влияния погрешностей изготовления ТПС на однородность поля в рабочей области. Все

перечисленные вопросы имеют важное практическое значение и требуют рассмотрения.

Список литературы

1. Максвелл Дж. К. Трактат об электричестве и магнетизме. Т. II. – М. : Наука, 1989. С. 283–284.
2. McKeehan L. W. Combinations of circular currents for producing uniform magnetic fields // Review of Scientific Instruments. 1936. Vol. 7. P. 150–153.
3. Garret M. W. Thick cylindrical coil systems for strong magnetic fields with field or gradient homogeneities of the 6th to 20th order // Journal of Applied Physics. 1967. No. 38. P. 2563–2586.
4. Caprari R. S. Optimal current loop systems for producing uniform magnetic fields // Measurement Science and Technology. 1995. Vol. 6, No. 5. P. 593–597.
5. Средства измерений параметров магнитного поля / Ю. В. Афанасьев, Н. В. Студенцов, В. Н. Хорев [и др.]. Л. : Энергия. Ленингр. отд-ние, 1979. С. 40.
6. Луганский Л. Б. Синтез полей в соленоидальных магнитных системах (обзор) // Приборы и техника эксперимента. 1992. № 4. С. 9–36.
7. Varanov P., Varanova V. Modeling axial 8-coil system for generating uniform magnetic field in COMSOL // MATEC Web of Conferences, Vol. 48, 03001, 2016. P. 1–6.
8. Бессонов Л. А. Теоретические основы электротехники. Электромагнитное поле. М. : Высш. шк. 1986. С. 103–104.
9. Форсайт Дж., Малькольм М., Моулер К. Машинные методы математических вычислений. – М. : Мир. 1980. С. 210–255.
10. Цейлин Л. А. Об одной возможности получения однородного магнитного поля // Журнал технической физики. 1957. Т. XXVII. Вып. 12. С. 2792–2793.
11. Adamiak K. Synthesis of homogeneous magnetic field in internal region of cylindrical solenoid // Archiv für Elektrotechnik. 1980. No. 62. P. 75–79.
12. Тихонов А. Н., Арсенин В. Я. Методы решения некорректных задач. – М. : Наука, 1979. 285 с.
13. Воеводин В. В., Воеводин Вл. В. Энциклопедия линейной алгебры. Электронная система ЛИНЕАЛ. СПб. : БХВ-Петербург, 2006. 544 с.
14. Азгальдов Г. Г. Теория и практика оценки качества товаров (основы квалиметрии). – М. : Экономика, 1982. 256 с.
15. Саати Т. Принятие решений. Метод анализа иерархий. М. : Радио и связь, 1993. 278 с.

SYNTHESIS OF SIMPLE SYSTEMS THAT PRODUCE HOMOGENEOUS MAGNETIC FIELD

Klevets N. I.

*Academy of Bioresources and Environmental Management, V. I. Vernadsky Crimean Federal
University, Simferopol 295492, Russia
E-mail: pmsolution@mail.ru*

The simple current systems generating homogeneous magnetic field in working volume are considered. The problem of synthesis of the system is reduced to the solution of the system of linear algebraic equations with respect to unknown currents in circular loops. It is shown that highly homogeneous field cannot be created by means of the circular loops with current in the working volume of system. The maximum working volumes of the systems, in which the field differs from the homogeneous distribution on not more, than 0.001%, 0.1% and 1%, are found. The technique of systems comparison by many criteria is offered, and the example of such comparison is given.

Keywords: magnetic field, current system, Barker's system, Braunbek's system, Garret's system, Helmholtz's system, Maxwell's system, synthesis, multi-criteria ranking.

References

1. J. C. Maxwell, *Treatise on Electricity and Magnetism II*, Sec. 714, 715.
2. L. W. McKeehan, *Review of Scientific Instruments*, No. 7, 150–153 (1936).
3. M. W. Garret, *Journal of Applied Physics*, No. 38, 2563–2586 (1967).
4. R. S. Caprari, *Measurement Science and Technology* **6**, No. 5, 593–597 (1995).
5. Y. A. Afanac'ev et al, *Sredstva izmerenij parametrov magnitnogo polia [Devices for magnetic fields measurement]* (Energiya, Leningrad, 1979), P. 40. [in Russian].
6. L. B. Lugansky, *J. Phys. E : Sci. Instrum.* No. 4, 9–36 (1992).
7. P. Baranov, V. Baranova, *MATEC Web of Conferences* **48**, 03001, 1–6 (2016).
8. L. A. Bessonov, *Teoreticheskie osnovy elektrotehniki. Electromagnitnoe pole [Theoretical basises of electrical engineering. Electromagnetic field]* (Vyssh. shkola, Moscow, 1986), Pp. 103–104. [in Russian].
9. G. Forsythe, M. Malcolm, C. Moler, *Mashinnye metody matematicheskikh vychislenij [Computer methods for mathematical computations]* (Mir, Moscow, 1980), Pp. 210–255.
10. L. A. Ceitlin, *Journal of technical physics* **XXVII**, No. 12, 2792–2793 (1957).
11. K. Adamiak, *Archiv für Elektrotechnik*, No. 62, 75–79 (1980).
12. A. N. Tichonow, W. J. Arsenin, *Metody reshenia nekorrektnykh zadach [Methods of solving incorrect problems]* (Nauka, Moscow, 1974) [in Russian].
13. V. V. Voevodin, Vl. V. Voevodin, *Encyclopedia linejnoj algebry. Electronnaja sistema LINEAL [Encyclopedia of line algebra. Electronic system LINEAL]* (BHV-Peterburg, Sanct-Peterburg, 2006) [in Russian].
14. G. G. Azgaldov, *Teorija i praktika ocenki kachestva tovarov (osnovy kvalimetrii) [Theory and practice of goods quality estimation (fundamentals of qualimetry)]* (Ekonomika, Moscow, 1982) [in Russian].
15. T. Saaty, *Planirovanie reshenij. Metod analiza ierarhij [Decision making. The analytic hierarchy process]* (Radio i svjaz', Moscow, 1993) [in Russian].

Поступила в редакцию 27.10.2017 г. Принята к публикации 22.12.2017 г.
Received October 27, 2017. Accepted for publication December 22, 2017

УДК 004.056.54; 614.2

ПРОЕКТИРОВАНИЕ СИСТЕМЫ ЗАЩИТЫ ДЛЯ ТИПОВОЙ МЕДИЦИНСКОЙ ИНФОРМАЦИОННОЙ СИСТЕМЫ

Григорьев П. Е.^{1*}, Оленчук А. В.¹, Гольдберг Д. Л.¹, Тишков А. В.², Лускова Ю. С.³

¹*Физико-технический институт, Крымский федеральный университет имени В.И. Вернадского, Симферополь 295007, Россия*

²*Первый Санкт-Петербургский государственный медицинский университет имени академика И. П. Павлова, Санкт-Петербург 197022, Россия*

³*Медицинская академия имени С. И. Георгиевского, Крымский федеральный университет имени В. И. Вернадского, Симферополь 295007, Россия*

**E-mail: grigorievpe@cfuv.ru*

Статья посвящена рассмотрению ключевых этапов проектирования системы безопасности для типовой медицинской информационной системы. Актуализация данного вопроса обусловлена общемировой тенденцией увеличения количества кибератак на информационные системы в сфере здравоохранения за последние годы. Обеспечение необходимого уровня информационной безопасности регулируется нормативно-правовыми документами Правительства Российской Федерации, Федеральной службы безопасности, Федеральной службы по техническому и экспортному контролю, международными и национальными стандартами. Был проанализирован перечень актуальных документов, на основании которого рассмотрены основные аспекты при проектировании системы информационной безопасности. Определены: базовая модель угроз безопасности информации, базовый набор организационных и технических мер защиты информации, а также обоснован оптимальный класс защищенности для типовой медицинской информационной системы. Составлен алгоритм проектирования системы информационной безопасности, который может оказаться полезным для руководителей медицинских организаций, а также администраторов подсистемы безопасности в медицинской информационной системе.

Ключевые слова: информационная безопасность, персональные данные, медицинская информационная система, здравоохранение.

PACS: *k 89.20.Ff*

ВВЕДЕНИЕ

Процесс информатизации здравоохранения начался в Российской Федерации несколько десятилетий назад. Однако полномасштабное развитие данной отрасли было невозможным в силу ограниченных возможностей вычислительной техники и каналов связи. Начало XXI века ознаменовало новый виток в развитии информатизации здравоохранения в России. Была разработана и утверждена Концепция создания Единой государственной информационной системы в сфере здравоохранения (ЕГИСЗ), с 2011 года начата ее реализация. В ближайшее время уже во всех регионах завершится период «базовой» информатизации здравоохранения, что является необходимым условием для развития Электронного здравоохранения РФ. По мнению экспертов в данной области, «точка невозврата» уже пройдена, и вопрос «быть или не быть информатизации здравоохранения РФ», уже не стоит [1]. Примечательно, что в ежегодном Послании Президента Федеральному Собранию за 2016 год В. В. Путин подчеркнул, что в будущем следует продолжать наращивать уровень информатизации, чтобы сделать удобной и

простой запись на прием, ведение документации. «Нужно освободить врачей от рутины, от заполнения вороха отчётов и справок, дать им больше времени для непосредственной работы с пациентом» [2].

Таким образом, наличие информационных систем (ИС) в каждом медицинском учреждении страны – это неотвратимое будущее, которое необходимо приближать и, к которому, в свою очередь, следует готовиться. Современные информационные системы имеют множество подсистем, отдельное место среди которых занимает подсистема информационной безопасности, выполняя одновременно сквозную и интегральную функцию по отношению ко всему функционалу системы. Однако, зачастую вопросами информационной безопасности в медицинских информационных системах (МИС) пренебрегают или уделяют недостаточное внимание.

Однако в свете постоянного ужесточения законодательства о защите информации и персональных данных (ПДн) [3, 4] актуальность приобретает комплексная проблема обоснования необходимого уровня информационной безопасности в МИС, с конкретными рекомендациями для разработчиков. Задачи данной работы:

- актуализировать проблемы информационной безопасности в сфере здравоохранения;
- описать алгоритм проектирования системы защиты для типовой МИС на основе существующих нормативно правовых актов РФ;
- проанализировать основные аспекты проектирования системы защиты для типовой МИС.

Для решения поставленных задач проанализированы нормативно-правовые акты по защите персональных данных в учреждениях здравоохранения и основные требования регулирующих органов, предъявляемые к аппаратным, программным и организационным средствам по защите персональных данных.

1. СТАТИСТИКА КИБЕРПРЕСТУПЛЕНИЙ В СФЕРЕ ЗДРАВООХРАНЕНИЯ

Информационные технологии, которые широко используются в современной медицине, наряду с преимуществами как для медицинских организаций, так и для пациентов, несут и значительные риски. Связаны они в первую очередь с обеспечением безопасности персональных данных (ПДн). Рассмотрим общемировые тенденции.

Исследование компании IBM [5] показало, что в 2015 году здравоохранение заняло первое место в рейтинге наиболее часто атакуемых отраслей. Пять из восьми самых крупных утечек медицинских данных с 2010 года, когда более миллиона записей были скомпрометированы хакерами, случились в первом полугодии 2015 года. В целом за 2015 год было скомпрометировано более 100 миллионов записей о пациентах. Отмечается, что за пять лет, в период с 2010 по 2015 гг. количество кибератак выросло на 125%. По данным опросов, личная информация о состоянии здоровья на черном рынке считается в 50 раз ценнее финансовой [6].

Согласно опубликованному в мае 2016 года исследованию института Ponemon [7], около 90% медицинских организаций подверглись хотя бы одной хакерской атаке на протяжении последних двух лет, а 45% из них претерпели более пяти атак в тот же период. Устранение последствий от подобных правонарушений обходится мировому здравоохранению в 6,2 млрд. долларов. В 2016 году произошел ряд киберпреступлений в сфере здравоохранения, которые получили широкую огласку. Так, например, в феврале кибератаке подвергся частный медицинский центр Hollywood Presbyterian Medical Center в Лос-Анджелесе (США). В результате атаки произошли неполадки в работе компьютерной сети учреждения, а подавляющее большинство файлов оказалось зашифрованным. Для восстановления информации медицинскому центру пришлось заплатить хакерам выкуп в размере около 17 тыс. долларов [8, 9]. В марте подобной атаке, после которой также пришлось заплатить выкуп, подверглась больница Henderson Methodist в Хендерсоне (США). В результате действий злоумышленников была нарушена работа электронных веб-услуг учреждения [10]. Две больницы, Chinese Valley Medical Center и Desert Valley Hospital, принадлежащие крупному провайдеру медицинских услуг в США (Prime Healthcare Management, Inc.), в марте также были атакованы киберпреступниками, однако IT-специалистам удалось отразить действие вредоносного кода [11]. Киберпреступления против медицинских учреждений происходят не только в США. Так, например, по данным международной телерадиокомпании Deutsche Welle, в феврале несколько больниц в Германии пострадали от шифровальщиков, среди них – Lukas Hospital в Нойсе и Klinikum Arnsberg в Северном Рейне-Вестфалии [12]. В мае хакерская организация «Anonymous» провела кибератаку и проникла в систему серверов государственных больниц Турции. Хакеры скопировали базу данных пациентов, после чего удалили ее с серверов. В результате злоумышленникам удалось уничтожить базу данных пациентов 33 государственных госпиталей [13]. В феврале 2017 года информационные ресурсы Министерства здравоохранения Российской Федерации подверглись массивной хакерской атаке, которая в пиковом режиме достигала 4 млн. запросов в минуту. Серьезных последствий удалось избежать. ПДн или данные, составляющие врачебную тайну затронуты не были, поскольку находятся в защищенной части сети, не связанной с интернетом [14].

В целом, исходя из приведенной статистики киберпреступлений в сфере здравоохранения, следует, что спрос злоумышленников на личные медицинские сведения пациентов неуклонно растет. По мнению экспертов компании KPMG [15], особая важность медицинских данных о пациентах, по сравнению с другими персональными данными, объясняется тем, что последствия их утечки сложнее устранить. Более того, многие организации даже не знают, что они подвержены хакерским атакам, и поэтому недооценивают угрозу. Зачастую хакеры проникают в информационные системы организаций и предпочитают оставаться незамеченными до тех пор, пока не извлекут максимальный объем данных. В связи с этим медицинские учреждения, использующие информационные системы для обработки медицинских данных пациентов, обязаны обратить должное внимание на

обеспечение информационной безопасности и обеспечить оптимальный уровень защищенности данных.

2. ОПРЕДЕЛЕНИЕ НЕОБХОДИМОГО УРОВНЯ ЗАЩИЩЕННОСТИ ПЕРСОНАЛЬНЫХ ДАННЫХ И КЛАССА ЗАЩИЩЕННОСТИ МЕДИЦИНСКИХ ИНФОРМАЦИОННЫХ СИСТЕМ

В российском законодательстве имеется целый ряд нормативно-правовых документов, регламентирующих обеспечение информационной безопасности ПДн в ИС [16-21].

Система защиты ПДн должна включать в себя организационные и технические меры с учетом актуальных угроз безопасности ПДн и информационных технологий, используемых в ИС. Первоочередным в создании системы защиты ПДн является определение уровня защищенности ПДн. Уровень защищенности ПДн – это комплексный показатель, который характеризует выполнение требований, нейтрализующих угрозы безопасности информационных систем ПДн. В Постановлении Правительства РФ от 01.11.2012 №1119 «Об утверждении требований к защите персональных данных при их обработке в информационных системах персональных данных» [22] установлены 4 уровня защищенности ПДн. Необходимый уровень защищенности определяется: категорией обрабатываемых ПДн; видом обработки по форме отношений между субъектами и организацией; количеством субъектов; типом актуальных угроз.

В работе [23] был определен и обоснован необходимый уровень защищенности ПДн, обрабатываемых в медицинских информационных системах (МИС). Типовая МИС, реализующая электронный документооборот, электронную регистратуру и цифровую обработку данных мониторинга состояния пациента, является обработчиком данных специальной категории. Для МИС, субъектами ПДн которой являются менее 100 000 пациентов, достаточно обеспечения третьего уровня защищенности.

После того, как установлен необходимый уровень защищенности ПДн, следует определить класс защищенности ИС. Определение класса защищенности ИС проводится в соответствии с пунктом 14.2 Требованиям о защите информации, не составляющей государственную тайну, содержащуюся в государственных информационных системах, утвержденных ФСТЭК России от 11 февраля 2013 г. №17.

Устанавливаются четыре класса защищенности ИС (первый класс (К1), второй класс (К2), третий класс (К3), четвертый класс (К4)), определяющие уровни защищенности содержащейся в ней информации. Самый низкий класс – четвертый, самый высокий – первый.

Класс защищенности ИС определяется в зависимости от уровня значимости информации (УЗ), обрабатываемой в этой ИС, и масштаба ИС (федеральный, региональный, объектовый):

$$\text{Класс защищенности (К)} = F [\text{УЗ; масштаб системы}]. \quad (1)$$

Уровень значимости информации определяется степенью возможного ущерба для обладателя информации и оператора от нарушения конфиденциальности, целостности или доступности информации:

$$УЗ = F [(конфиденциальность, степень ущерба); \\ (целостность, степень ущерба); \\ (доступность, степень ущерба)], \quad (2)$$

где степень возможного ущерба определяется обладателем информации и (или) оператором самостоятельно.

Степень возможного ущерба:

- высокая, если в результате нарушения одного из свойств безопасности информации (конфиденциальность, целостность, доступность) возможны существенные негативные последствия в социальной, политической, международной, экономической, финансовой или иных областях деятельности и ИС или оператор не могут выполнять возложенные функции;
- средняя, если в результате нарушения одного из свойств безопасности информации (конфиденциальность, целостность, доступность) возможны умеренные негативные последствия в социальной, политической, международной, экономической, финансовой или иных областях деятельности и ИС или оператор не могут выполнять возложенные функции;
- низкая, если в результате нарушения одного из свойств безопасности информации (конфиденциальность, целостность, доступность) возможны незначительные негативные последствия в социальной, политической, международной, экономической, финансовой или иных областях деятельности и ИС или оператор могут выполнять возложенные функции с недостаточной эффективностью или выполнение функций возможно только с привлечением дополнительных средств [24].

Информация имеет:

- высокий уровень значимости (УЗ 1), если хотя бы для одного из свойств безопасности информации (конфиденциальность, целостность, доступность) определена высокая степень ущерба;
- средний уровень значимости (УЗ 2), если хотя бы для одного из свойств безопасности информации (конфиденциальность, целостность, доступность) определена средняя степень ущерба и нет ни одного свойства, для которого определена высокая степень ущерба;
- низкий уровень значимости (УЗ 3), если для всех свойств безопасности информации (конфиденциальность, целостность, доступность) определена низкая степень ущерба;
- минимальный уровень значимости (УЗ4), если обладателем информации и (или) оператором степень ущерба от нарушения свойств безопасности информации не может быть определена, но при этом информация подлежит защите в соответствии с законодательством РФ [25].

Масштаб ИС определяется назначением и распределенностью сегментов ИС:

- федеральный масштаб, если она функционирует на территории РФ и имеет сегменты в субъектах РФ;
- региональный масштаб, если она функционирует на территории субъекта РФ и имеет сегменты в одном или нескольких муниципальных образованиях, подведомственных и иных организациях;
- объектовый масштаб, если она функционирует на объектах одного федерального органа государственной власти субъекта РФ и не имеет сегментов в территориальных органах, представительствах, филиалах, подведомственных и иных организациях [24].

Класс защищенности ИС определяется согласно [25] (табл. 1):

Таблица 1. Определение класса защищенности ИС

Уровень значимости информации	Масштаб информационной системы		
	Федеральный	Региональный	Объектовый
УЗ 1	К1	К1	К1
УЗ 2	К1	К2	К2
УЗ 3	К2	К3	К3
УЗ 4	К3	К3	К4

Одновременно с этим, определение класса защищенности ИС осуществляется с учетом требуемого уровня защищенности ПДн. В соответствии с пунктом 27 Требований Приказа ФСТЭК России от 11 февраля 2013 г. № 17, должно быть обеспечено соответствующее соотношение класса защищенности ИС с уровнем защищенности ПДн. В случае, если определенный уровень защищенности ПДн выше чем установленный класс защищенности ИС, то осуществляется повышение класса защищенности в соответствии со следующими требованиями [24]:

- для ИС 1 класса защищенности обеспечивают 1, 2, 3 и 4 уровни защищенности ПДн;
- для ИС 2 класса защищенности обеспечивают 2, 3 и 4 уровни защищенности ПДн;
- для ИС 3 класса защищенности обеспечивают 3 и 4 уровни защищенности ПДн;
- для ИС 4 класса защищенности обеспечивают 4 уровень защищенности ПДн [25].

Таким образом, на этапе определения класса защищенности ИС может возникнуть коллизия. Обусловлена она тем, что между уровнем защищенности ПДн и уровнем значимости информации, очевидно, должна существовать связь. Однако, в рассмотренных нормативно-правовых документах, соответствие между этими двумя параметрами однозначно не определено. С одной стороны, класс защищенности ИС определяется уровнем значимости информации и масштабом ИС, а с другой стороны – должен обеспечивать соответствующие уровни защищенности ПДн. Рассмотрим эту проблему на примере МИС. Ранее был определен и обоснован необходимый уровень защищенности ПДн в МИС [23] – для

реализации защиты ПДн МИС, субъектами которой являются менее 100 000 пациентов, достаточно обеспечить 3 уровень защищенности. Из соотношения класса защищенности ИС с уровнем защищенности ПДн видно, что подобной МИС должен быть присвоен 3 класс защищенности ИС – К3.

В то же время, определяя класс защищенности ИС с использованием показателей УЗ информации и масштаба ИС, можно получить иной класс. Большинству МИС, внедряемых в конкретную медицинскую организацию, можно присвоить объектовый масштаб. Если хотя бы одному из свойств информации (конфиденциальность, целостность, доступность) в МИС присвоить среднюю степень возможного ущерба, то информации будет присвоен УЗ 2. А данное сочетание масштаба ИС (объектовый) и уровня значимости информации (УЗ 2) соответствует 2 классу защищенности ИС – К2. Иными словами, установленный ранее уровень защищенности ПДн для МИС обеспечивается ИС с классом защищенности К3, но одновременно с тем, расчетное значение по показателям УЗ и масштаб может указывать на необходимость использования ИС с классом защищенности К2. К сожалению, в рассмотренных документах не указано, чем следует руководствоваться в подобных случаях. Какой из параметров: уровень защищенности ПДн, либо уровень значимости информации, является приоритетным в выборе класса защищенности ИС? Есть ли между ними однозначное соответствие? Вопросы эти остаются открытыми и требуют особого внимания, поскольку класс защищенности ИС определяет перечень необходимых для обеспечения информационной безопасности организационных и технических мер, выполнение которых может сопровождаться значительными финансовыми издержками.

Исходя из трудностей с финансированием у многих медицинских организаций, дополнительные финансовые издержки, связанные с обеспечением информационной безопасности ИС, могут оказаться критическими. Поэтому, руководствуясь документом [24], в котором указано, что уровень защищенности определяет оператор самостоятельно, важно обосновать наиболее оптимальный класс защищенности ИС для типичной МИС, которым, с нашей точки зрения, является третий класс защищенности ИС – К3.

3. ВЫБОР МЕР ЗАЩИТЫ ИНФОРМАЦИИ В МЕДИЦИНСКИХ ИНФОРМАЦИОННЫХ СИСТЕМАХ

Выбор мер защиты информации осуществляется исходя из класса защищенности ИС, угроз безопасности информации (УБИ), включенных в модель угроз, а также с учетом структурно-функциональных характеристик ИС.

Меры защиты информации в ИС должны быть направлены на обеспечение:

- конфиденциальности информации (исключение ее неправомерного доступа, копирования, предоставления и распространения);
- целостности информации (исключение ее неправомерного уничтожения или модифицирования);
- доступности информации (исключение ее неправомерного блокирования) [24].

Меры защиты информации, выбираемые для реализации в ИС, должны обеспечивать блокирование одной или нескольких УБИ, включенных в модель угроз безопасности информации.

Состав и содержание организационных и технических мер по обеспечению безопасности ПДн при их обработке в ИС определяется:

- приказом ФСТЭК России от 11.02.2013 г. № 17 «Об утверждении Требований по защите информации, не составляющих государственную тайну, содержащейся в государственных информационных системах»;
- приказом ФСТЭК России от 18.02.2013 г. № 21 «Об утверждении состава и содержания организационных и технических мер по обеспечению безопасности персональных данных при их обработке в информационных системах персональных данных»;
- приказом ФСБ России от 10.07.2014 г. № 378 «Об утверждении Состав и содержания организационных и технических мер по обеспечению безопасности персональных данных при их обработке в информационных системах персональных данных с использованием средств криптографической защиты информации, необходимых для выполнения установленных Правительством Российской Федерации требований к защите персональных данных для каждого из уровней защищенности».

Из анализа вышеперечисленных документов следует, что в ИС третьего класса защищенности должны быть реализованы технические меры с применением:

- средств вычислительной техники не ниже пятого класса;
- системы обнаружения вторжений и средства антивирусной защиты не ниже четвертого класса в случае взаимодействия ИС с информационно-телекоммуникационными сетями международного информационного обмена;
- межсетевых экранов не ниже третьего класса в случае взаимодействия ИС с информационно-телекоммуникационными сетями международного информационного обмена [25].

Под средствами вычислительной техники понимается совокупность программных и технических элементов системы обработки данных, способных функционировать самостоятельно или в составе других систем. Классификация средств вычислительной техники по уровню защищенности от несанкционированного доступа установлена руководящим документом «Средства вычислительной техники. Защита от несанкционированного доступа к информации. Показатели защищенности от несанкционированного доступа к информации», утвержденным Государственной технической комиссией (ныне ФСТЭК) при Президенте РФ от 30 марта 1992 г. [26].

Выбор организационных мер защиты информации для их реализации в ИС включает (рис. 1):

- определение базового набора мер защиты информации для установленного класса защищенности ИС;
- адаптацию базового набора мер защиты информации для установленного класса защищенности ИС;

- уточнение адаптированного базового набора мер защиты информации с учетом не выбранных ранее мер защиты информации для нейтрализации УБИ, включенных в модель угроз безопасности;
- дополнение уточненного адаптированного базового набора мер защиты информации мерами, обеспечивающими выполнение требований о защите информации, установленными иными нормативно-правовыми актами в области защиты информации.

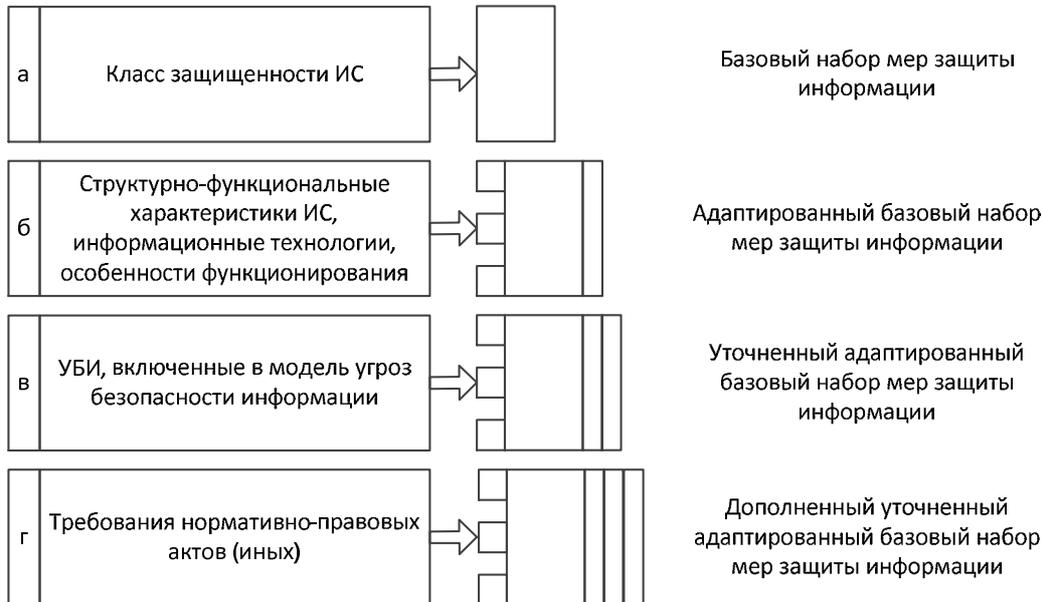


Рис. 1. Общий порядок действий по выбору мер защиты информации для их реализации в ИС

Определение базового набора мер защиты информации является первым шагом в выборе мер защиты информации, подлежащих реализации в ИС, и основывается на классе защищенности ИС [24].

Для типовой МИС был определен третий класс защищенности ИС, поэтому, руководствуясь методическим документом «Меры защиты информации в государственных информационных системах», должны быть обеспечены следующие базовые меры защиты информации.

I. Идентификация и аутентификация субъектов доступа и объектов доступа (ИАФ):

ИАФ.1. Идентификация и аутентификация пользователей, являющихся работниками оператора.

ИАФ.3. Управление идентификаторами, в том числе создание, присвоение, уничтожение идентификаторов. Требования к усилению: 1) оператором должно быть исключено повторное использование идентификатора пользователя в течение периода более года; 2) оператором должно быть обеспечено блокирование

идентификатора пользователя через период времени не более 90 дней неиспользования.

ИАФ.4. Управление средствами аутентификации, в том числе хранение, выдача, инициализация, блокирование средств аутентификации и принятие мер в случае утраты и (или) компрометации средств аутентификации. Требования к усилению: в случае использования в ИС механизмов аутентификации на основе пароля или применения пароля в качестве одного из факторов многофакторной аутентификации, его характеристики должны быть следующими: длина пароля не менее шести символов, алфавит пароля не менее 60 символов, максимальное количество неуспешных попыток аутентификации до блокировки от 3 до 10 попыток, блокировка программно-технического средства или учетной записи пользователя в случае достижения установленного максимального количества неуспешных попыток аутентификации от 5 до 30 минут, смена паролей не более чем через 120 дней.

ИАФ.5. Защита обратной связи при вводе аутентификационной информации.

ИАФ.6. Идентификация и аутентификация пользователей, не являющихся работниками оператора (внешних пользователей).

II. Управление доступом субъектов доступа к объектам доступа (УПД):

УПД.1. Управление (заведение, активация, блокирование и уничтожение) учетными записями пользователей, в том числе внешних пользователей. Требования к усилению: 1) оператором должны использоваться автоматизированные средства поддержки управления учетными записями; 2) в ИС должно осуществляться автоматическое блокирование временных учетных записей пользователей по окончании установленного периода времени для их использования.

УПД.2. Реализация необходимых методов (дискреционный, мандатный, ролевой или иной метод), типов (чтение, запись, выполнение или иной тип) и правил разграничения доступа. Требования к усилению: 1) в ИС правила разграничения доступа должны обеспечивать управление доступом субъектов при входе в ИС; 2) в ИС правила разграничения доступа должны обеспечивать управление доступом субъектов к техническим средствам, устройствам, внешним устройствам; 3) в ИС правила разграничения доступа должны обеспечивать управление доступом субъектов к объектам, создаваемым общесистемным программным обеспечением.

УПД.4. Разделение обязанностей полномочий (ролей), администраторов и лиц, обеспечивающих функционирование ИС.

УПД.5. Назначение минимально необходимых прав и привилегий пользователям, администраторам и лицам, обеспечивающим функционирование ИС.

УПД.6. Ограничение неуспешных попыток входа в ИС.

УПД.10. Блокирование сеанса доступа в ИС после установленного времени бездействия (неактивности) пользователя или по его запросу.

УПД.11. Разрешение (запрет) действий пользователей, разрешенных до идентификации и аутентификации.

УПД.13. Реализация защищенного удаленного доступа субъектов доступа к объектам доступа через внешние информационно-телекоммуникационные сети. Требования к усилению: 1) в ИС используется ограниченное (минимально необходимое) количество точек подключения к ИС при организации удаленного доступа к объектам доступа ИС; 2) в ИС исключается удаленный доступ от имени привилегированных учетных записей (администраторов) для администрирования ИС и ее системы защиты информации.

УПД.14. Регламентация и контроль использования в ИС технологий беспроводного доступа. Требования к усилению: идентификация и аутентификация устройств, в том числе стационарных, мобильных и портативных.

УПД.15. Регламентация и контроль использования в ИС мобильных технических средств.

УПД.16. Управление взаимодействием с ИС сторонних организаций. Требования к усилению: оператор предоставляет доступ к ИС авторизованным (уполномоченным) пользователям внешних ИС или разрешает обработку, хранение и передачу информации с использованием внешней ИС при выполнении следующих условий: 1) при наличии договора (соглашения) об информационном взаимодействии с оператором внешней ИС; 2) при наличии подтверждения выполнения во внешней ИС предъявленных к ней требований о защите информации (наличие аттестата соответствия требованиям по безопасности информации или иного подтверждения).

III. Ограничение программной среды (ОПС):

ОПС.3. Установка (инсталляция) только разрешенного к использованию программного обеспечения и его компонентов.

IV. Защита машинных носителей информации (ЗНИ):

ЗНИ.1. Учет машинных носителей информации.

ЗНИ.2. Управление доступом к машинным носителям информации.

ЗНИ.8. Уничтожение (стирание) информации на машинных носителях при их передаче между пользователями, в сторонние организации для ремонта или утилизации, а также контроль уничтожения (стирания). Требования к усилению: 1) оператором должны быть обеспечены регистрация и контроль действий по удалению защищаемой информации и уничтожению машинных носителей информации; 2) оператором должны применяться следующие меры по уничтожению (стиранию) информации на машинных носителях, исключающие возможность восстановления защищаемой информации: перезапись уничтожаемых (стираемых) файлов случайной битовой последовательностью, удаление записи о файлах, обнуление журнала файловой системы и полная перезапись всего адресного пространства машинного носителя информации случайной битовой последовательностью с последующим форматированием.

V. Регистрация событий безопасности (РСБ):

РСБ.1. Определение событий безопасности, подлежащих регистрации, и сроков их хранения.

РСБ.2. Определение состава и содержания информации о событиях безопасности, подлежащих регистрации.

РСБ.3. Сбор, запись и хранение информации о событиях безопасности в течение установленного времени хранения.

РСБ.4. Реагирование на сбои при регистрации событий безопасности, в том числе аппаратные и программные ошибки, сбои в механизмах сбора информации и достижение предела или переполнения объема (емкости) памяти.

РСБ.5. Мониторинг (просмотр, анализ) результатов регистрации событий.

РСБ.6. Генерирование временных меток и (или) синхронизация системного времени в ИС.

РСБ.7. Защита информации о событиях безопасности.

VI. Антивирусная защита (АВЗ):

АВЗ.1. Реализация антивирусной защиты. Требования к усилению: в ИС должно обеспечиваться предоставление прав по управлению (администрированию) средствами антивирусной защиты администратору безопасности.

АВЗ.2. Обновление базы данных признаков вредоносных компьютерных программ (вирусов).

VII. Контроль (анализ) защищенности информации (АНЗ):

АНЗ.1. Выявление, анализ уязвимостей ИС и оперативное устранение вновь выявленных уязвимостей. Требования к усилению: 1) оператором обеспечивается использование для выявления (поиска) уязвимостей средств анализа (контроля) защищенности (сканеров безопасности), имеющих стандартизованные (унифицированные) в соответствии с национальными стандартами описание и перечни программно-аппаратных платформ, уязвимостей, проверочных списков, процедур тестирования и языка тестирования ИС на наличие уязвимостей, оценки последствий уязвимостей, имеющих возможность оперативного обновления базы данных выявляемых уязвимостей; 2) оператором предоставляется доступ только администраторам к функциям выявления (поиска) уязвимостей (предоставление такой возможности только администраторам безопасности).

АНЗ.2. Контроль установки обновлений программного обеспечения, включая обновление программного обеспечения средств защиты информации.

АНЗ.3. Контроль работоспособности, параметров настройки и правильности функционирования программного обеспечения и средств защиты информации.

АНЗ.4. Контроль состава технических средств, программного обеспечения и средств защиты информации.

АНЗ.5. Контроль правил генерации и смены паролей пользователей, заведения и удаления учетных записей пользователей, реализации правил разграничения доступом, полномочий пользователей в ИС.

IX. Обеспечение целостности информационной системы и информации (ОЦЛ):

ОЦЛ.3. Обеспечение возможности восстановления программного обеспечения, включая программное обеспечение средств защиты информации, при возникновении нештатных ситуаций.

XI. Защита среды виртуализации (ЗСВ):

ЗСВ.1. Идентификация и аутентификация субъектов доступа и объектов доступа в виртуальной инфраструктуре, в том числе администраторов управления средствами виртуализации.

ЗСВ.2. Управление доступом субъектов доступа к объектам доступа в виртуальной инфраструктуре, в том числе внутри виртуальных машин. Требования к усилению: 1) в ИС должен обеспечиваться доступ к операциям, выполняемым с помощью средств управления виртуальными машинами, в том числе к операциям создания, запуска, останова, создания копий, удаления виртуальных машин, который должен быть разрешен только администраторам виртуальной инфраструктуры; 2) в ИС должен обеспечиваться доступ к конфигурации виртуальных машин только администраторам виртуальной инфраструктуры.

ЗСВ.3. Регистрация событий безопасности в виртуальной инфраструктуре.

ЗСВ.9. Реализация и управление антивирусной защитой в виртуальной инфраструктуре.

ХII. Защита технических средств (ЗТС):

ЗТС.2. Организация контролируемой зоны, в пределах которой постоянно размещаются стационарные технические средства, обрабатывающие информацию, и средства защиты информации, а также средства обеспечения функционирования.

ЗТС.3. Контроль и управление физическим доступом к техническим средствам, средствам защиты информации, средствам обеспечения функционирования, а также в помещения и сооружения, в которых они установлены, исключающие несанкционированный физический доступ к средствам обработки информации, средствам защиты информации и средствам обеспечения функционирования ИС и помещения и сооружения, в которых они установлены.

ЗТС.4. Размещение устройств вывода (отображения) информации, исключающее ее несанкционированный просмотр.

ХIII. Защита информационной системы, ее средств, систем связи и передачи данных (ЗИС):

ЗИС.3. Обеспечение защиты информации от раскрытия, модификации и навязывания (ввода ложной информации) при ее передаче (подготовке к передаче) по каналам связи, имеющим выход за пределы контролируемой зоны, в том числе беспроводным каналам связи.

ЗИС.5. Запрет несанкционированной удаленной активации видеокамер, микрофонов и иных периферийных устройств, которые могут активироваться удаленно, и оповещение пользователей об активации таких устройств.

ЗИС.20. Защита беспроводных соединений, применяемых в ИС.

ЗИС.30. Защита мобильных технических средств, применяемых в ИС [24].

После того, как определен базовый набор мер защиты информации, следует этап адаптации базового набора. На этом этапе учитываются структурно-функциональные характеристики конкретной ИС, применяемые информационные технологии, особенности функционирования ИС. В частности, адаптация базового набора мер защиты информации предусматривает исключение мер, непосредственно связанных с информационными технологиями, не используемыми в ИС. Так, в случае, если в ИС не применяются технологии виртуализации, то меры по защите среды виртуализации следует исключить. В данном контексте «виртуализация» – это технология преобразования формата или параметров программных либо сетевых запросов к компьютерным ресурсам с целью

обеспечения независимости процессов обработки информации от программной или аппаратной платформы ИС.

На следующем этапе проектирования системы информационной безопасности выполняется уточнение адаптированного базового набора мер защиты информации с учетом возможности адекватно блокировать все УБИ, включенные в модель угроз безопасности информации, или же снизить вероятность их реализации. В качестве исходных данных выбирается перечень УБИ и их характеристики (потенциал, оснащенность, мотивация), включенные в модель угроз безопасности. Затем каждой УБИ сопоставляется мера защиты информации (из адаптированного базового набора мер защиты информации), которая обеспечивает блокирование или снижает вероятность ее реализации. В том случае, если адаптированный базовый набор мер защиты информации не обеспечивает блокирование всех угроз безопасности, в него дополнительно включаются меры защиты информации, не указанные ранее.

Дополнение уточненного адаптированного базового набора мер защиты информации осуществляется в случае предъявления дополнительных требований к защите информации в ИС, не указанных в вышеперечисленных нормативных актах. В случае, если сформированный набор мер защиты информации содержит меры защиты информации, которые невозможно или затруднительно реализовать в силу каких-либо причин (высокая стоимость, большие сроки реализации и другие), должны быть реализованы компенсирующие меры защиты. Исходные данные для разработки компенсирующих мер защиты информации следует выбирать в первую очередь из требований о защите информации [25], методического документа ФСТЭК по мерам защиты [24], международных и национальных стандартов, стандартов организаций в области информационной безопасности. Кроме этого, в качестве компенсирующих мер защиты информации могут быть использованы результаты собственных научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ. При этом использование компенсирующих мер защиты должно быть обосновано и аргументировано [24].

На этапе уточнения адаптированного базового набора мер защиты информации используется модель угроз безопасности, которая составляется на основании методического документа «Базовая модель угроз безопасности персональных данных при их обработке в информационных системах персональных данных» [27].

4. СОСТАВЛЕНИЕ МОДЕЛИ УГРОЗ И ВЫБОР АКТУАЛЬНЫХ УГРОЗ

В зависимости от технологий, состава и характеристик технических средств ИС ПДн, а также опасности реализации угроз безопасности ПДн и наступления последствий в результате несанкционированного или случайного доступа выделяют следующие типы ИС ПДн:

- автоматизированные рабочие места, не подключенные к сетям общего пользования и международного информационного обмена;
- автоматизированные рабочие места, подключенные к сетям общего пользования и международного информационного обмена;

- локальные ИС ПДн, не имеющие подключение к сетям связи общего пользования и международного информационного обмена;
- локальные ИС ПДн, имеющие подключение к сетям связи общего пользования и сетям международного информационного обмена;
- распределенные ИС ПДн, не подключенные к сетям связи общего пользования и сетям международного информационного обмена;
- распределенные ИС ПДн, подключенные к сетям связи общего пользования и сетям международного информационного обмена.

Для каждого типа ИС ПДн из представленных выше разработана типовая модель угроз безопасности ПДн, которая может быть дополнена, исходя из структурно-функциональных характеристик конкретной ИС.

Исходя из структуры медицинских организаций и внедряемых в них МИС, можно сделать вывод, что наибольшее распространение получили локальные ИС ПДн, имеющие подключение к сетям связи общего пользования и сетям международного информационного обмена. Согласно типовой модели угроз для данной ИС ПДн возможна реализация следующих угроз безопасности ПДн:

- угрозы утечки информации по техническим каналам;
- угрозы несанкционированного доступа к ПДн, обрабатываемым на автоматизированном рабочем месте.

Угрозы утечки информации по техническим каналам включают в себя: угрозы утечки акустической (речевой) информации, угрозы утечки видовой (графической, видео- и буквенно-цифровой) информации, угрозы утечки информации по каналу побочных электромагнитных излучений и наводок.

Угрозы несанкционированного доступа связаны с действиями нарушителей, реализующих угрозы непосредственно в ИСПДн, в том числе, при помощи аппаратных закладок и отчуждаемых носителей вредоносных программ, а также нарушителей, не имеющих доступа к ИСПДн, реализующих угрозы из внешних сетей связи общего пользования и сетей международного информационного обмена.

Угрозы из внешних сетей включают:

- угрозы «Анализа сетевого трафика» с перехватом передаваемой во внешние сети и принимаемой из внешних сетей информации;
- угрозы сканирования, направленные на выявление типа операционной системы ИСПДн, сетевых адресов рабочих станций, открытых портов и служб, открытых соединений и др.;
- угрозы выявления паролей;
- угрозы получения несанкционированного доступа путем подмены доверенного объекта;
- угрозы типа «Отказ в обслуживании»;
- угрозы удаленного запуска приложений;
- угрозы внедрения по сети вредоносных программ.

С целью адаптации модели угроз под конкретную МИС, важной задачей является определение актуальных угроз безопасности.

УБИ определяются по результатам оценки возможностей внешних и внутренних нарушителей, анализа возможных уязвимостей ИС, возможных

способов реализации УБИ и последствий от нарушения свойств безопасности информации. Эффективность принимаемых мер защиты информации в ИС зависит от качества определений УБИ для конкретной ИС в конкретных условиях ее функционирования. Поэтому для ИС разрабатывается модель угроз, которая представляет собой формализованное описание УБИ [24]. Актуальной считается угроза, которая может быть реализована в ИС ПДн и представляет опасность для ПДн. Для оценки возможности реализации угрозы применяются два показателя: уровень исходной защищенности ИС ПДн и частота (вероятность) реализации рассматриваемой угрозы.

Под уровнем исходной защищенности ИС ПДн понимается обобщенный показатель, зависящий от следующих технических и эксплуатационных характеристик:

- территориальное размещение;
- наличие соединения с сетями общего пользования;
- встроенные операции с записями баз ПДн;
- разграничение доступа к ПДн;
- наличие соединения с другими базами ПДн иных ИС ПДн;
- уровень обезличивания ПДн;
- объем ПДн, предоставляются сторонним пользователям ИСПДн без предварительной обработки [27].

Исходная степень защищенности определяется по методике, указанной в документе «Методика определения актуальных угроз безопасности персональных данных при их обработке в информационных системах персональных данных» и может иметь несколько уровней исходной защищенности. Причем каждому уровню ставится в соответствие числовой коэффициент Y_1 :

- $Y_1 = 0$, если присвоен высокий уровень исходной защищенности;
- $Y_1 = 5$, если присвоен средний уровень исходной защищенности;
- $Y_1 = 10$, если присвоен низкий уровень исходной защищенности.

Частота (вероятность) реализации угрозы определяется экспертным путем, также имеет градацию, и ей в соответствие ставится числовой коэффициент Y_2 :

- $Y_2 = 0$, для маловероятной угрозы, когда отсутствуют объективные предпосылки для осуществления угрозы;
- $Y_2 = 2$, для низкой вероятности угрозы, когда объективные предпосылки для осуществления угрозы существуют, но принятые меры существенно затрудняют ее реализацию;
- $Y_2 = 5$, для средней вероятности угрозы, когда объективные предпосылки для осуществления угрозы существуют, но принятые меры обеспечения безопасности ПДн недостаточны;

- $Y_2 = 10$, для высокой вероятности угрозы, когда объективные предпосылки для осуществления угрозы существуют и меры по обеспечению безопасности ПДн не приняты.

С учетом изложенного коэффициент реализуемости угрозы Y будет определяться следующим соотношением:

$$Y = (Y_1 + Y_2) / 20 \quad (3)$$

Интерпретация реализуемости угрозы проводится так:

- при $0 \leq Y \leq 0,3$ возможность реализации угрозы низкая;
- при $0,3 \leq Y \leq 0,6$ – средняя;
- при $0,6 \leq Y \leq 0,8$ – высокая;
- при $Y > 0,8$ – очень высокая [28].

Далее на основе экспертной оценки определяется уровень опасности каждой угрозы. Оценка выполняется с использованием Общей системы оценки уязвимостей (Common Vulnerability Scoring System – CVSS) [29]. В настоящее время наибольшее распространение в практической деятельности по оценке опасности уязвимостей получила версия 2.0 общей системы оценки уязвимостей, хотя существует и более новая версия 3.0. Система оценки CVSS v 2.0 состоит из трех групп метрик (критериев): базовых, временных и контекстных. На основании этих метрик строятся векторы уязвимости. Группа базовых метрик (критериев) отражает аспекты опасности уязвимости, влияющие на доступность, целостность и конфиденциальность информации. Группа временных метрик (критериев) отражает характеристики уязвимости, которые изменяются со временем (подтверждение технических параметров уязвимости, статус исправления уязвимости и доступность технологии эксплуатации), но не зависят от среды функционирования программного обеспечения. Группа контекстных метрик (критериев) отражает характеристики уязвимости, зависящие от среды функционирования программного обеспечения.

Количественная оценка степени опасности уязвимости проводится по результатам анализа базового вектора уязвимости. Временные и контекстные векторы применяются только в тех случаях, когда возникает необходимость уточнения базового вектора.

Численное значение базового вектора уязвимости (базовая оценка) может варьироваться в пределах от 0 до 10.

На основе численного значения базового вектора V уязвимости (базовой оценки) присваиваются один из четырех уровней опасности:

- при $0,0 \leq V \leq 3,9$ присваивается низкий уровень опасности, реализация угрозы может привести к незначительным негативным последствиям для субъектов ПДн;
- при $4,0 \leq V \leq 6,9$ присваивается средний уровень опасности, реализация угрозы может привести к негативным последствиям для субъектов ПДн;

- при $7,0 \leq V \leq 9,9$ присваивается высокий уровень опасности, реализация угрозы может привести к значительным негативным последствиям для субъектов ПДн;
- при $V = 10,0$ присваивается критический уровень опасности, реализация угрозы может привести к критическим негативным последствиям для субъектов ПДн.

Более подробную информацию о расчете численного значения базового вектора V можно найти на официальном сайте ФСТЭК [30].

После выполнения всех вышеописанных операций, определяется перечень актуальных угроз [28] (табл. 2):

Таблица 2. Определение актуальности угрозы

Возможность реализации угрозы	Уровень опасности угрозы		
	Низкий	Средний	Высокий (Критический)
Низкая	неактуальная	неактуальная	актуальная
Средняя	неактуальная	актуальная	актуальная
Высокая	актуальная	актуальная	актуальная
Очень высокая	актуальная	актуальная	актуальная

Таким образом, для конкретной МИС разрабатывается модель угроз, с учетом ее структурно-функциональных характеристик, применяемых информационных технологий и особенностей функционирования. Исходя из вышесказанного, построен алгоритм проектирования системы защиты для типовой МИС (рис. 2).

Пунктирная стрелка на рис. 2 между этапами определения уровня защищенности ПДн и уровня значимости информации сигнализирует о наличии между ними связи, не до конца определенной в имеющихся нормативно-правовых документах.

Следует также отметить, что в процессе классификации для снижения затрат на средства защиты ПДн и оптимизации работы подсистемы безопасности ИС можно провести логическую и (или) физическую сегментацию ИС ПДн. Таким образом, в зависимости от характеристик обрабатываемой информации конкретному сегменту ИС присваивается свой класс защищенности.

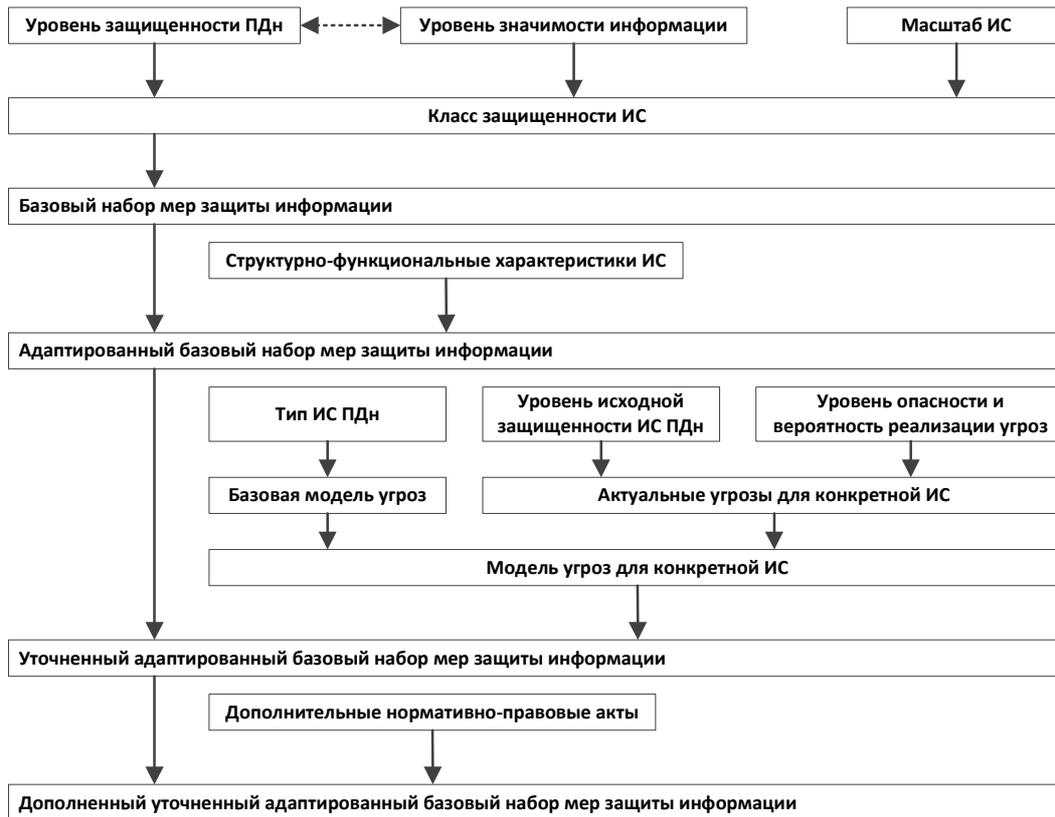


Рис. 2. Алгоритм проектирования системы защиты для типовой МИС

При составлении алгоритма проектирования системы защиты для типовой МИС нельзя обойти вниманием такие документы, как «Методические рекомендации для организации защиты информации при обработке персональных данных в учреждениях здравоохранения, социальной сферы, труда и занятости» [31] и «Методические рекомендации по составлению Частной модели угроз безопасности персональных данных при их обработке в информационных системах персональных данных учреждений здравоохранения, социальной сферы, труда и занятости» [32]. Обусловлено это тем, что указанные методические рекомендации разъясняют многие аспекты по интерпретации Федерального закона от 27.07.2006 N 152-ФЗ о персональных данных [33] относительно МИС. Они содержат в себе описание конкретных шагов при разработке и внедрении подсистемы безопасности МИС, что, безусловно, будет полезным для руководителей медицинских организаций и администраторов системы. В то же время, понимая их значимость и важность, по ряду причин авторы статьи намеренно не акцентируют внимание на этих двух документах.

Во-первых, авторы статьи старались абстрагироваться от описания решений для конкретных МИС. Основной направленностью исследования являлось

освещение общих этапов проектирования и задание своего рода «дорожной карты» при разработке подсистемы информационной безопасности, вне зависимости от индивидуальных особенностей, имеющих в тех или иных медицинских организациях. В связи с этим мы намеренно избегали избыточной детализации при описании ключевых этапов проектирования подсистемы информационной безопасности, сохраняя логическую дистанцию и не претупая границу между обобщенными рекомендациями и кейсовым решением. Поэтому разработка кейсовых решений – отдельный вид деятельности, который не вписывается в рамки данной статьи.

Во-вторых, упомянутые методические рекомендации [31, 32] являются вторичными текстами, которые ссылаются, в том числе, на первичные документы [27, 28, 33], проанализированные в статье.

В-третьих, часть информации, представленной в данных рекомендациях, является устаревшей и не актуальной. Обусловлено это тем, что в них не учитываются изменения и поправки, которые произошли в нормативно-правовой документации, после издания рекомендаций. К примеру, в указанных методических рекомендациях предлагается проводить классификацию ИС ПДн согласно Приказу ФСТЭК России, ФСБ России, Мининформсвязи России от 13.02.2008 N 55/86/20 «Об утверждении Порядка проведения классификации информационных систем персональных данных», который на сегодняшний день отменен и признан утратившим силу. Другой пример, в этих методических рекомендациях порой используют термины, которые не являются официально признанными и которые нельзя использовать при формировании официальных документов. Данные примеры свидетельствуют о том, что неумелое использование упомянутых методических рекомендаций может привести к негативным последствиям для медицинской организации, внедряющей у себя подсистему информационной безопасности.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Вопросу информационной безопасности в МИС следует уделять пристальное внимание, что связано с участвовавшими случаями киберпреступлений в сфере здравоохранения. В статье описаны основные этапы проектирования системы защиты ПДн в типовой МИС. В частности, обоснован оптимальный класс защищенности ИС, исходя из которого перечислены базовые технические и организационные меры защиты информации. Выбрана оптимальная типовая модель угроз для МИС и указаны рекомендации к определению актуальных угроз. Проведенный в статье анализ зиждется на нормативно-правовых актах в области защиты ПДн. Рекомендации, изложенные в статье, могут быть полезны для руководителей медицинских организаций в качестве отправной точки при проектировании системы безопасности в ИС и конкретизации требований к разработчикам МИС.

Список литературы

1. Зарубина Т. В. // Сибирский вестник медицинской информатики и информатизации здравоохранения. 2016. №1. С. 6–11.
2. Послание Президента Федеральному Собранию [электронный ресурс] URL : <http://kremlin.ru/events/president/news/53379> (дата обращения : 23.11.2017).
3. О внесении изменений в Кодекс Российской Федерации об административных правонарушениях [электронный ресурс] URL : <http://kremlin.ru/acts/news/53836> (дата обращения : 23.11.2017).
4. Путин подписал закон о персональных данных [электронный ресурс] URL : <https://ria.ru/society/20170207/1487378476.html> (дата обращения : 23.11.2017).
5. Reviewing a year of serious data breaches, major attacks and new vulnerabilities. Analysis of cyber attack and incident from IBM's worldwide security services operations [электронный ресурс] URL : <http://www-01.ibm.com/common/ssi/cgi-bin/ssialias?subtype=WH&infotype=SA&htmlfid=SEW03133USEN&attachment=SEW03133USEN.PDF> (дата обращения : 25.11.2017).
6. Healthcare underspends on cybersecurity as attacks accelerate [электронный ресурс] URL : <http://www.modernhealthcare.com/article/20160303/NEWS/160309922/healthcare-underspends-on-cybersecurity-as-attacks-accelerate> (дата обращения : 25.02.2017).
7. Sixth annual benchmark study on privacy & security of healthcare data. Ponemon Institute LLC. 2016. 50 с. [электронный ресурс] URL : https://media.scmagazine.com/documents/232/sixth_annual_benchmark_study_o_57783.pdf (дата обращения : 11.09.2017).
8. Клиника выплатила выкуп хакерам: киберпреступность в медицине [электронный ресурс] URL : <https://www.health-ua.org/news/21266.html> (дата обращения : 13.08.2017).
9. Булович С. Кибербезопасность информационных систем. Подход “Лаборатории Касперского” [электронный ресурс] URL : <http://compaslidera.ru/files/documents/Dopmaterial/ZPD-19042016/Kaspersky.pdf> (дата обращения : 11.10.2017).
10. Backup And Recovery System Allows Methodist Hospital To Regain Control After Ransomware Attack. Health IT Outcomes [электронный ресурс] URL : <https://www.healthitoutcomes.com/doc/backup-recovery-system-control-ransomware-attack-0001> (дата обращения : 14.11.2017).
11. Two more healthcare networks caught up in outbreak of hospital ransomware [электронный ресурс] URL : <https://arstechnica.com/security/2016/03/two-more-healthcare-networks-caught-up-in-outbreak-of-hospital-ransomware/> (дата обращения : 23.09.2017).
12. Hackers hold German hospital data hostage [электронный ресурс] URL : <http://www.dw.com/en/hackers-hold-german-hospital-data-hostage/a-19076030> (дата обращения : 23.09.2017).
13. Хакеры Anonymous атаковали больничную систему Турции [электронный ресурс] URL : <http://newsturk.ru/2016/05/18/hakeryi-anonymous-atakovali-bolnichnyuyu-sistemu-turtsii/> (дата обращения : 23.02.2017).
14. Технические службы Минздрава России отразили самую масштабную за последние годы хакерскую атаку [электронный ресурс] URL : <https://www.rosminzdrav.ru/news/2017/02/11/5085-tehnicheskie-sluzhby-minzdrava-rossii-otrazili-samuyu-masshtabnyuyu-za-poslednie-gody-hakerskuuyu-ataku> (дата обращения : 14.11.2017).
15. Health care and cyber security : increasing threats require increased capabilities [электронный ресурс] URL : <https://assets.kpmg.com/content/dam/kpmg/pdf/2015/09/cyber-health-care-survey-kpmg-2015.pdf> (дата обращения : 14.08.2017).
16. Указ Президента Российской Федерации от 06 марта 1997 № 188 (ред. от 13.07.2015) «Об утверждении Перечня сведений конфиденциального характера».
17. Указ Президента Российской Федерации от 17 марта 2008 № 351 (ред. от 22.05.2015) «О мерах по обеспечению информационной безопасности Российской Федерации при использовании информационно-телекоммуникационных сетей международного информационного обмена».
18. Постановление Правительства Российской Федерации от 06 июля 2008 N 512 (ред. от 27.12.2012) «Об утверждении требований к материальным носителям биометрических персональных данных и технологиям хранения таких данных вне информационных систем персональных данных».

19. Постановление Правительства Российской Федерации от 06 июля 2008 N 512 (ред. от 27.12.2012) «Об утверждении требований к материальным носителям биометрических персональных данных и технологиям хранения таких данных вне информационных систем персональных данных».
 20. Постановление Правительства Российской Федерации от 06 июля 2008 N 512 (ред. от 27.12.2012) «Об утверждении требований к материальным носителям биометрических персональных данных и технологиям хранения таких данных вне информационных систем персональных данных».
 21. Приказ Роскомнадзора от 30 мая 2017 года № 94 «Об утверждении методических рекомендаций по уведомлению уполномоченного органа о начале обработки персональных данных и о внесении изменений в ранее представленные сведения».
 22. Постановление Правительства РФ от 01.11.2012 № 1119 «Об утверждении требований к защите персональных данных при их обработке в информационных системах персональных данных».
 23. Гольдберг Д. Л., Григорьев П. Е., Оленчук А. В. // Биотехносфера. 2016. № 2 (44). С. 12–16.
 24. Методический документ. Меры защиты информации в государственных информационных системах: утв. ФСТЭК России от 11 февраля 2014 г. [электронный ресурс] URL : <http://bdu.fstec.ru/documents/24> (дата обращения : 15.09.2017).
 25. Требования о защите информации, не составляющей государственную тайну, содержащейся в государственных информационных системах: утв. приказом ФСТЭК России от 11 февраля 2013 г. № 17. 2013. [электронный ресурс] URL : <http://bdu.fstec.ru/documents/21> (дата обращения : 18.10.2017).
 26. Руководящий документ. Средства вычислительной техники. Защита от несанкционированного доступа к информации. Показатели защищенности от несанкционированного доступа к информации: утв. решением председателя Государственной технической комиссии при Президенте Российской Федерации от 30 марта 1992 г. [электронный ресурс] URL : <http://fstec.ru/tekhnicheskaya-zashchita-informatsii/dokumenty/114-spetsialnye-normativnye-dokumenty/385-rukovodyashchij-dokument-reshenie-predsedatelya-gostekhkommisii-rossii-ot-30-marta-1992-g2> (дата обращения : 18.10.2017).
 27. Базовая модель угроз безопасности персональных данных при их обработке в информационных системах персональных данных (выписка): утв. заместителем директора ФСТЭК России от 15 февраля 2008 г. [электронный ресурс] URL : <http://bdu.fstec.ru/documents/16> (дата обращения : 20.10.2017).
 28. Методика определения актуальных угроз безопасности персональных данных при их обработке в информационных системах: утв. заместителем директора ФСТЭК России от 14 февраля 2008 г. [электронный ресурс] URL : <http://bdu.fstec.ru/documents/18> (дата обращения : 14.09.2017).
 29. Официальный сайт некоммерческой организации FIRST [электронный ресурс] URL : <https://www.first.org/cvss/v2> (дата обращения : 23.02.2017).
 30. Банк данных угроз безопасности информации ФСТЭК России [электронный ресурс] URL : <http://bdu.fstec.ru/cvss2> (дата обращения : 23.02.2017).
 31. Методические рекомендации для организации защиты информации при обработке персональных данных в учреждениях здравоохранения, социальной сферы, труда и занятости: согласовано с начальником 2 управления ФСТЭК от 22 декабря 2009 г., утверждено директором Департамента информатизации Министерства здравоохранения и социального развития Российской Федерации от 23 декабря 2009 г. М. : Министерство здравоохранения и социального развития, 2009. 94 с.
 32. Методические рекомендации по составлению Частной модели угроз безопасности персональных данных при их обработке в информационных системах персональных данных учреждений здравоохранения, социальной сферы, труда и занятости: согласовано с начальником 2 управления ФСТЭК от 22 декабря 2009 г., утверждено директором Департамента информатизации Министерства здравоохранения и социального развития Российской Федерации от 23 декабря 2009 г. М. : Министерство здравоохранения и социального развития, 2009. 215 с.
 33. Федеральный закон от 27.07.2006 г. № 152-ФЗ (ред. от 04.06.2014 г.) «О персональных данных».
-

ELABORATION OF SECURITY SYSTEM FOR A TYPICAL MEDICAL
INFORMATION SYSTEM

Grigoriev P. E.^{1*}, Olenchuk A. V.¹, Goldberg D. L.¹, Tishkov A. V.², Luskova Yu. S.³

¹Physics and Technology Institute, V. I. Vernadsky Crimean Federal University, Simferopol 295007, Russia

²Pavlov First Saint Petersburg State Medical University, Saint Petersburg 197022, Russia

³Medical Academy named after S. I. Georgievsky, V. I. Vernadsky Crimean Federal University, Simferopol 295007, Russia

*E-mail: grigorievpe@cfuv.ru

The article is dedicated the key stages of development of security system stages for a typical medical information system. The actualization of this problem is due to a global trend of increasing of cyberattacks for information systems in the healthcare in recent years. Providing the necessary level of information security is governed by the legal documents of the Russian Federation, the Federal Security Service, the Federal Service for Technical and Export Control, the international and national standards. Relevant documents were analyzed, based on which the basic aspects of the design of information security were considered. The basic model of information security threats, set of organizational and technical actions to protect information were defined, as well as optimal protection class for a typical health information system is grounded. An algorithm for the security system design development, which can be useful for the leaders of medical institutions, as well as the security subsystem administrators in the medical information system is proposed.

Keywords: information security, personal data, medical information system, healthcare.

References

1. T. V. Zarubina, *Sibirskij vestnik medicinskoj informatiki i informatizacii zdravoohranenija*, No 1, 6–11 (2016) [in Russian].
2. Poslanie Prezidenta Federal'nomu Sobraniju [Message from the President to the Federal Assembly], Available : <http://kremlin.ru/events/president/news/53379> [in Russian].
3. O vnesenii izmenenij v Kodeks Rossijskoj Federacii ob administrativnyh pravonarushenijah [Amendments to the Russian Federation Code of Administrative Offences]. Oficial'nyj sajt Prezidenta Rossijskoj Federacii [The official website of the Russian President]. Available : <http://kremlin.ru/acts/news/53836> [in Russian].
4. Putin podpisal zakon o personal'nyh dannyh [Putin signed a law on personal data]. RIA Novosti [RIA News]. Available : <https://ria.ru/society/20170207/1487378476.html> [in Russian].
5. Reviewing a year of serious data breaches, major attacks and new vulnerabilities. Analysis of cyber attack and incident from IBM's worldwide security services operations. IBM. Available : <http://www-01.ibm.com/common/ssi/cgi-bin/ssialias?subtype=WH&infotype=SA&htmlfid=SEW03133USEN&attachment=SEW03133USEN.PDF>
6. Healthcare underspends on cybersecurity as attacks accelerate. Available: <http://www.modernhealthcare.com/article/20160303/NEWS/160309922/healthcare-underspends-on-cybersecurity-as-attacks-accelerate>
7. Sixth annual benchmark study on privacy & security of healthcare data. Available : https://media.scmagazine.com/documents/232/sixth_annual_benchmark_study_o_57783.pdf
8. Klinika vyplatila vykup hakeram: kiberprestupnost' v medicine [Clinic ransom hackers to cybercrime in medicine]. Available : <https://www.health-ua.org/news/21266.html> [in Russian].

9. Bulovich S. Kiberbezopasnost' informacionnyh sistem. Podhod "Laboratorii Kasperskogo" [Cybersecurity information systems. Approach "Kaspersky Lab"]. Available : <http://compaslidera.ru/files/documents/Dopmaterial/ZPD-19042016/Kaspersky.pdf> [in Russian].
10. Backup And Recovery System Allows Methodist Hospital To Regain Control After Ransomware Attack. Health IT Outcomes. Available : <https://www.healthitoutcomes.com/doc/backup-recovery-system-control-ransomware-attack-0001>
11. Two more healthcare networks caught up in outbreak of hospital ransomware. Ars Technica. Available : <https://arstechnica.com/security/2016/03/two-more-healthcare-networks-caught-up-in-outbreak-of-hospital-ransomware/>
12. Hackers hold German hospital data hostage. Deutsche Welle. Available: <http://www.dw.com/en/hackers-hold-german-hospital-data-hostage/a-19076030>
13. Hakery Anonymous atakovali bol'nichnuju sistemu Turcii [Anonymous Hackers attacked the hospital system in Turkey]. Available : <http://newsturk.ru/2016/05/18/hakeryi-anonymous-atakovali-bolnichnuyu-sistemu-turtsii/> [in Russian].
14. Tehnicheskie sluzhby Minzdrava Rossii otrazili samuju masshtabnuju za poslednie gody hakerskuju ataku [Technical Service of the Russian Ministry of Health repel the most massive in recent years, hacker attack. Available : <https://www.rosminzdrav.ru/news/2017/02/11/5085-tehnicheskie-sluzhby-minzdrava-rossii-otrazili-samuyu-masshtabnuyu-za-poslednie-gody-hakerskuyu-ataku> [in Russian].
15. Health care and cyber security: increasing threats require increased capabilities. Available : <https://assets.kpmg.com/content/dam/kpmg/pdf/2015/09/cyber-health-care-survey-kpmg-2015.pdf>
16. Ukaz Prezidenta Rossiyskoy Federatsii ot 06 marta 1997 № 188 (red. ot 13.07.2015) «Ob utverzhdenii Perechnya svedeniy konfidentsial'nogo kharaktera» [Decree of the President of the Russian Federation of March 6, 1997 No. 188 (as amended on July 13, 2015) “On approval of the List of Confidential Information”] [in Russian].
17. Ukaz Prezidenta Rossiyskoy Federatsii ot 17 marta 2008 № 351 (red. ot 22.05.2015) «O merakh po obespecheniyu informatsionnoy bezopasnosti Rossiyskoy Federatsii pri ispol'zovanii informatsionno-telekommunikatsionnykh setey mezhdunarodnogo informatsionnogo obmena» [Presidential Decree of March 17, 2008 No. 351 (as amended on 05.22.2015) “On measures to ensure the information security of the Russian Federation when using information and telecommunication networks of international information exchange”] [in Russian].
18. Postanovleniye Pravitel'stva Rossiyskoy Federatsii ot 06 iyulya 2008 N 512 (red. ot 27.12.2012) «Ob utverzhdenii trebovaniy k material'nym nosityelam biometricheskikh personal'nykh dannykh i tekhnologiyam khraneniya takikh dannykh vne informatsionnykh sistem personal'nykh dannykh» [Decree of the Government of the Russian Federation dated July 6, 2008 N 512 (as amended on 12/27/2012) “On approval of requirements for tangible carriers of biometric personal data and technologies for storing such data outside of personal data information systems”] [in Russian].
19. Postanovleniye Pravitel'stva Rossiyskoy Federatsii ot 06 iyulya 2008 N 512 (red. ot 27.12.2012) «Ob utverzhdenii trebovaniy k material'nym nosityelam biometricheskikh personal'nykh dannykh i tekhnologiyam khraneniya takikh dannykh vne informatsionnykh sistem personal'nykh dannykh» [Decree of the Government of the Russian Federation dated July 6, 2008 N 512 (as amended on 12/27/2012) “On approval of requirements for tangible carriers of biometric personal data and technologies for storing such data outside of personal data information systems”] [in Russian].
20. Postanovleniye Pravitel'stva Rossiyskoy Federatsii ot 06 iyulya 2008 N 512 (red. ot 27.12.2012) «Ob utverzhdenii trebovaniy k material'nym nosityelam biometricheskikh personal'nykh dannykh i tekhnologiyam khraneniya takikh dannykh vne informatsionnykh sistem personal'nykh dannykh» [Decree of the Government of the Russian Federation dated July 6, 2008 N 512 (as amended on 12/27/2012) “On approval of requirements for tangible carriers of biometric personal data and technologies for storing such data outside of personal data information systems”] [in Russian].
21. Prikaz Roskomnadzora ot 30 maya 2017 goda № 94 «Ob utverzhdenii metodicheskikh rekomendatsiy po uvedomleniyu upolnomochennogo organa o nachale obrabotki personal'nykh dannykh i o vnesenii izmeneniy v raneye predstavlennoye svedeniya» [Order of Roskomnadzor dated May 30, 2017 No. 94 “On approval of guidelines for notifying the authorized body about the beginning of the processing of personal data and the introduction of changes to previously submitted information”] [in Russian].

22. Postanovlenie Pravitel'stva RF ot 01.11.2012 № 1119 «Ob utverzhdenii trebovanij k zashhite personal'nyh dannyh pri ih obrabotke v informacionnyh sistemah personal'nyh dannyh» [Resolution of the RF Government of 01.11.2012 №1119 «On approval of requirements for the protection of personal data at their processing in information systems of personal data"'] [in Russian].
23. D. L. Gol'dberg, P. E. Grigor'ev, A. V. Olenchuk, *Biotehnosfera*, No 2 (44), 12–16 (2016) [in Russian].
24. Metodicheskij dokument. Mery zashhity informacii v gosudarstvennyh informacionnyh sistemah: utv. FSTJeK Rossii ot 11 fevralja 2014 g. [Methodological document. Measures of information protection in state information systems: approved. FSTEC Russia on February 11, 2014]. Available : <http://bdu.fstec.ru/documents/24> [in Russian].
25. Trebovanija o zashhite informacii, ne sostavljajushhej gosudarstvennuju tajnu, sodержashhejsja v gosudarstvennyh informacionnyh sistemah: utv. prikazom FSTeK Rossii ot 11 fevralja 2013 g. № 17 [The data protection requirements, not the state secret contained in the state information systems : approved by FSTEC order of Russia from February 11, 2013 № 17]. Available : <http://bdu.fstec.ru/documents/21> [in Russian].
26. Rukovodjashhij dokument. Sredstva vychislitel'noj tehniki. Zashhita ot nesankcionirovannogo dostupa k informacii. Pokazateli zashhishhennosti ot nesankcionirovannogo dostupa k informacii: utv. resheniem predsedatelja Gosudarstvennoj tehničeskoj komissii pri Prezidente Rossijskoj Federacii ot 30 marta 1992 g. [Guidance document. Means of computer facilities. Protection against unauthorized access to information. Indicators of security against unauthorized access to information: approved. The decision of the Chairman of the State Technical Commission under the President of the Russian Federation of March 30, 1992]. Available: <http://fstec.ru/tehnicheskaya-zashchita-informatsii/dokumenty/114-spetsialnye-normativnye-dokumenty/385-rukovodyashchij-dokument-reshenie-predsedatelya-gostekkomissii-rossii-ot-30-marta-1992-g2> [in Russian].
27. Bazovaja model' ugroz bezopasnosti personal'nyh dannyh pri ih obrabotke v informacionnyh sistemah personal'nyh dannyh (vypiska): utv. zamestitelem direktora FSTJeK Rossii ot 15 fevralja 2008 g. [The basic model of personal data security threats at their processing within the information systems of personal data (excerpt): approved. Deputy Director FSTEC Russia on February 15, 2008]. Available : <http://bdu.fstec.ru/documents/16> [in Russian].
28. Metodika opredelenija aktual'nyh ugroz bezopasnosti personal'nyh dannyh pri ih obrabotke v informacionnyh sistemah: utv. zamestitelem direktora FSTJeK Rossii ot 14 fevralja 2008 g. [Methods of determining the actual threats of personal data security at their processing in information systems: approved. Deputy Director FSTEC Russia of February 14, 2008]. Available : <http://bdu.fstec.ru/documents/18> [in Russian].
29. Oficial'nyj sajt nekommercheskoj organizacii FIRST [The official website for a nonprofit organization FIRST]. Available : <https://www.first.org/cvss/v2> [in Russian].
30. Bank dannyh ugroz bezopasnosti informacii [Data Bank information security threats]. Available : <http://bdu.fstec.ru/cvss2> [in Russian].
31. Metodicheskie rekomendacii dlja organizacii zashhity informacii pri obrabotke personal'nyh dannyh v uchrezhdenijah zdavoohranenija, social'noj sfery, truda i zanjatosti: soglasovano s nachal'nikom 2 upravlenija FSTJeK ot 22 dekabrja 2009 g., utverzhdeno direktorom Departamenta informatizacii Ministerstva zdavoohranenija i social'nogo razvitija Rossijskoj Federacii ot 23 dekabrja 2009 g. [Guidelines for the organization of information security in the processing of personal data in health care, social services, labor and employment: agreed with the chief management FSTEC 2 of 22 December 2009, approved by the Director of the Ministry of Health of the Department of Informatization and Social Development of the Russian Federation of December 23, 2009.]. M., 2009. 94 p. [in Russian].
32. Metodicheskie rekomendacii po sostavleniju Chastnoj modeli ugroz bezopasnosti personal'nyh dannyh pri ih obrabotke v informacionnyh sistemah personal'nyh dannyh uchrezhdenij zdavoohranenija, social'noj sfery, truda i zanjatosti: soglasovano s nachal'nikom 2 upravlenija FSTJeK ot 22 dekabrja 2009 g., utverzhdeno direktorom Departamenta informatizacii Ministerstva zdavoohranenija i social'nogo razvitija Rossijskoj Federacii ot 23 dekabrja 2009 g. [Guidelines for the preparation of partial models of threats of personal data security at their processing within the information systems of personal data of health facilities, social services, labor and employment: agreed with the chief management FSTEC 2 of 22 December 2009, approved by the Director of the Ministry of Health and the Department of Informatization social development of the Russian Federation of December 23, 2009].

Ministerstvo zdravooohranenija i social'nogo razvitija [The Ministry of Health and Social Development].
M., 2009. 215 p. [in Russian].

33. Federal'nyj zakon ot 27.07.2006 g. № 152-FZ (red. ot 04.06.2014 g.) «O personal'nyh dannyh» [Federal
Law of 27.07.2006 № 152-FL (ed. from 6.4.2014) "On personal data"].

*Поступила в редакцию 05.11.2017 г. Принята к публикации 22.12.2017 г.
Received November 05, 2017. Accepted for publication December 22, 2017*

СОДЕРЖАНИЕ

ФИЗИКА И МАТЕМАТИКА

1. **Магнитолазмонные структуры (Обзор). Часть 1**
Басиладзе Г. Д., Бержанский В. Н., Недвига А. С., Шапошников А. Н......5
2. **Поверхностные плазмон-поляритоны на границе металла и диэлектрического кристалла со сверхрешеткой**
Горишний В. А., Перескоков В. С., Дзедолик И. В.25
3. **Управление орбитальным угловым моментом электромагнитного излучения посредством мультигеликоидального волокна с дефектом скрутки**
Алексеев К. Н., Латин Б. П., Яворский М. А.36

ТЕХНИКА, ИНФОРМАТИКА И УПРАВЛЕНИЕ

4. **Синтез простейших систем, создающих однородное магнитное поле**
Клевец Н. И.47
 5. **Проектирование системы защиты для типовой медицинской информационной системы**
Григорьев П. Е., Оленчук А. В., Гольдберг Д. Л., Тишков А. В., Лускова Ю. С......63
- СОДЕРЖАНИЕ**89

TABLE OF CONTENTS

PHYSICS AND MATHEMATICS

1. **Magnetoplasmonic structures (Review). Part 1**
Basiladze G. D., Berzhansky V. N., Nedviga A. S., Shaposhnikov A. N. 5
2. **Surface plasmon polaritons on the boudary of metal and dielectric crystal with superlattice**
Gorishniy V. A., Pereskokov V. S., Dzedolik I. V. 25
3. **Orbital angular momentum control by a multihelicoidal fiber with a twist defect**
Alexeyev C. N., Lapin B. P., Yavorsky M. A. 36

TECHNICS, COMPUTER SCIENCE AND MANAGEMENT

4. **Synthesis of simple systems that produce homogeneous magnetic field**
Klevets N. I. 47
 5. **Elaboration of security system for a typical medical information system**
Grigoriev P. E., Olenchuk A. V., Goldberg D. L., Tishkov A. V., Luskova Yu. S. ... 63
- TABLE OF CONTENTS 90**

Научное периодическое издание, журнал
Scientific periodical, journal

**Вестник Физико-технического института Крымского
федерального университета имени В. И. Вернадского**
Journal of Physics and Technology Institute
of V. I. Vernadsky Crimean Federal University

Том 1 (67–69), № 4
Volume 1 (67–69), No. 4

Редакция:

д-р физ.-мат. наук, проф. Бержанский В. Н. – главный редактор
канд. физ.-мат. наук, доц. Глумова М. В. – заместитель главного редактора
канд. физ.-мат. наук Михайлова Т. В. – ответственный секретарь
Осокин К. С. – технический редактор, корректор

Компьютерная верстка – Осокин К. С., Михайлова Т. В.

**Печатается по решению Научно-технического совета Крымского федерального
университета имени В. И. Вернадского, протокол № 3 от «03» октября 2018 г.**

Подписано в печать 03.10.2018. Формат 70×100/16.
7,4 усл. п. л. 4,6 уч.-изд. л. Тираж 50 экз. Заказ № НП/243.
Подписной индекс издания в каталоге агентства «Роспечать» 64999.
Цена 300 руб. Дата выхода в свет 31.01.2019.
Отпечатано в управлении редакционно-издательской деятельности
ФГАОУ ВО «КФУ им. В. И. Вернадского»
295051, г. Симферополь, бул. Ленина, 5/7

Адрес редакции: 295007, Республика Крым, г. Симферополь,
пр-т Академика Вернадского, д. 4
E-mail: journal.phys.tech@cfuv.ru
Web-site: <http://jphystech.cfuv.ru/>
Тел.: +7 (3652) 51-70-95