

СОДЕРЖАНИЕ

ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ И СИСТЕМЫ

- Стародубцев В. Г. Алгоритм формирования последовательностей Гордона — Миллса — Велча..... 5
- Балошин Ю. А., Мехреньгин М. В., Арсеньев А. В., Сорокин А. А. Электродинамическая модель ВЧ-ближнепольного зондирования биологических объектов 10

ПРИБОРЫ И СИСТЕМЫ АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ

- Безрядин М. М., Лозгачев Г. И. Построение модального робастного регулятора при возмущающих и задающих воздействиях 16
- Малышев В. В., Кабанов Д. С. Алгоритм коррекции структуры управления автоматическим подводным аппаратом для построения области достижимости 21

ЭЛЕКТРОННЫЕ И ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ УСТРОЙСТВА

- Иванов В. В., Шакурский В. К., Шакурский М. В. Синтез цифровых фильтров для генераторных преобразователей повышенной чувствительности..... 28
- Ткалич В. Л., Лабковская Р. Я., Пирожникова О. И. Анализ присоединенных масс упругих чувствительных элементов ртутных герконов 32

ОПТИЧЕСКИЕ И ОПТИКО-ЭЛЕКТРОННЫЕ ПРИБОРЫ И СИСТЕМЫ

- Правдивцев А. В. Объектив для хроматической селекции спектральных компонентов изображения полихроматического кольцевого предмета 36
- Архипов Р. М., Архипов М. В., Егоров В. С., Чехонин И. А., Чехонин М. А., Багаев С. Н. Эффективное возбуждение поляритонных мод оптического резонатора с резонансно-поглощающим веществом без инверсии населенностей 42
- Романова Г. Э., Чечуров П. С. Моделирование вторичной оптики для светодиодов на основе линз с эффектом полного внутреннего отражения..... 48
- Иванова Л. А., Мелешко А. В., Пятков В. В., Ресовский В. А. Метод автоматической компенсации вибраций в теневом приборе с использованием оптимального дискриминатора 52
- Кузьмин Б. П., Мальцева Н. К., Минин А. В. Интерферометр-рефрактометр для измерения состава газовых и жидких проб 56
- Майоров Е. Е., Машек А. Ч., Прокопенко В. Т., Чистякова Н. Я. Исследование метрологических характеристик измерительной оптико-механической головки... 61

ТЕПЛОВЫЕ РЕЖИМЫ И НАДЕЖНОСТЬ ПРИБОРОВ И СИСТЕМ

- Баёва Ю. В., Демин А. В., Ханков С. И., Жуков С. И.** Моделирование теплового режима и термоаббераций малогабаритного космического телескопа..... 68

ТЕХНОЛОГИЯ ПРИБОРОСТРОЕНИЯ

- Яблочников Е. И., Брагинский В. А., Восоркин А. С.** Применение систем виртуального моделирования при выборе и проектировании полимерных композиционных материалов..... 75

- Гагарский С. В., Ермолаев В. С., Сергеев А. Н., Пузык М. В.** Исследование лучевой прочности диэлектрических покрытий, нанесенных на оптическую поверхность..... 80

- Итин А. Л., Лукин С. Б., Успенская М. В., Соловьев В. С.** Исследование оптических свойств акрилового гидрогеля для систем индикации загрязнений..... 85

КРАТКИЕ СООБЩЕНИЯ

- Романов А. Н., Хаула Е. В., Фаттахова З. Т., Вебер А. А., Корчак В. Н., Цветков В. Б., Сулимов В. Б.** Лазерная активная среда на основе фторидного стекла ZBLAN, легированного висмутом..... 91

- SUMMARY (*перевод Ю. И. Копилевича*)..... 94

CONTENTS

INFORMATION TECHNOLOGIES AND SYSTEMS

Starodubtsev V. G. An Algorithm of Gordon — Mills — Welch Sequence Formation 5

Baloshin Yu. A., Mekhrengin M. V., Arsen'ev A. V., Sorokin A. A. An Electrodynamic Model of the Near-Field High-Frequency Sounding of Biological Objects 10

DEVICES AND SYSTEMS OF AUTOMATIC CONTROL

Bezryadin M. M., Lozgachev G. I. Design of Robust Modal Controller Operating under Disturbing and Driving Actions 16

Malyshev V. V., Kabanov D. S. An Algorithm of Correction of Autonomous Underwater Vehicle Control Structure for Attainability Domain Construction 21

ELECTRONIC AND ELECTROMAGNETIC DEVICES

Ivanov V. V., Shakursky V. K., Shakursky M. V. Synthesis of Digital Filters for Generator Transformers with Increased Sensitivity 28

Tkalich V. L., Labkovskaya R. Ya., Pirozhnikova O. I. Attached Masses Analysis of Elastic Sensitive Elements of Mercury Reed Switches 32

OPTICAL AND OPTO-ELECTRONIC INSTRUMENTS AND SYSTEMS

Pravdivtsev A. V. A Lens for Chromatic Selection of Spectral Components in Ring-Shaped Polychromatic Object Image 36

Arkhipov R. M., Arkhipov M. V., Egorov V. S., Chekhonin I. A., Chekhonin M. A., Bagaev S. N. Effective Excitation of Polaritonic Modes in Optical Cavity with Resonant Inversionless Medium 42

Romanova G. E., Chechurov P. S. Modeling of Secondary Optics for Light Diodes on the Base of Total-Reflection Lens 46

Ivanova L. A., Meleshko A. V., Pyatkov V. V., Resovsky V. A. A Method for Automatic Compensation of Vibrations in Shadow Device with the Use of Optimal Discriminator 52

Kuzmin B. P., Maltseva N. K., Minin A. V. Interferometer-Refractometer for Determination of Gaseous and Liquid Samples Composition 56

Mayorov E. E., Mashek A. Ch., Prokopenko V. T., Chistyakova N. Ya. Study of Metrological Characteristics of a Measuring Optical-Mechanical Head 61

HEAT REGIMES AND RELIABILITY OF INSTRUMENTS AND SYSTEMS

Bayova Yu. V., Demin A. V., Khankov S. I., Zhukov S. I. Modeling of Thermal Conditions and Thermal Aberrations of a Small-Sized Space Telescope 68

INSTRUMENT-MAKING TECHNOLOGY

Yablochnikov E. I., Braginsky V. A., Vosorkin A. S. Implementation of Virtual Modeling Systems for Polimer Composite Materials Selection and Design.....	75
Gagarsky S. V., Ermolaev V. S., Sergeev A. N., Puzyk M. V. Study of Radiation Resistance of Dielectric Coating Deposited on Optical Surface	80
Itin A. L., Lukin S. B., Uspenskaya M. V., Soloviev V. S. Study of Optical Properties of Acrylic Hydrogel Used in Pollutants Display Systems.....	85
BRIEF NOTES	
Romanov A. N., Haula E. V., Fattakhova Z. T., Veber A. A., Korchak V. N., Tsvetkov V. B., Sulimov V. B. Laser Active Medium on the Base of Bismuth-Doped Fluoride Glass ZBLAN	91
SUMMARY	94

Editor-in-Chief E. B. Yakovlev

В. Г. СТАРОДУБЦЕВ

АЛГОРИТМ ФОРМИРОВАНИЯ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТЕЙ ГОРДОНА — МИЛЛСА — ВЕЛЧА

Предлагается алгоритм формирования последовательностей Гордона — Миллса — Велча, основанный на матричном представлении М-последовательностей с составным периодом, образуемых над конечными полями с двойным расширением.

Ключевые слова: последовательности с составным периодом, корреляционная функция, конечные поля, неприводимые и примитивные полиномы.

Одно из направлений развития современных систем связи и навигации — применение сигналов с расширенным спектром. Для реализации процедуры расширения спектра сигнала используются псевдослучайные последовательности (ПСП), в частности последовательности Гордона — Миллса — Велча (ГМВ). По корреляционным свойствам ГМВ-последовательности (ГМВП) аналогичны М-последовательностям [1—3], но обладают более высокой эквивалентной линейной сложностью, определяющей их структурную скрытность [2].

ГМВ-последовательности формируются над конечными полями с двойным расширением вида $GF[(p^m)^n]$, вследствие чего период данных последовательностей является составным числом, т.е. $N = p^{mn} - 1$, где p — характеристика поля, m, n — натуральные числа. В настоящее время широкое применение получили двоичные ГМВП, формируемые над полями с двойным расширением вида $GF[(2^m)^n]$. Символы d_i данных последовательностей с периодом $N = 2^{mn} - 1$ определяются в соответствии с выражением [4—6]

$$d_i = \text{tr}_{m1}[(\text{tr}_{mn,m}(\alpha^i))^r], \quad 1 \leq r < 2^m - 1, \quad (r, 2^m - 1) = 1, \quad (1)$$

где $\text{tr}_{mn,m}(\cdot)$ — след элемента поля с двойным расширением $GF[(2^m)^n]$, отображаемый в расширенном поле $GF(2^m)$; $\text{tr}_{m1}(\cdot)$ — след элемента расширенного поля $GF(2^m)$, отображаемый в простом поле $GF(2)$; $\alpha \in GF[(2^m)^n]$ — примитивный элемент поля с двойным расширением; параметр r является числом, взаимно простым с порядком мультипликативной группы расширенного поля $GF(2^m)$, равным $2^m - 1$.

При $r = 1$ согласно свойству функции следа выражение (1) описывает М-последовательность

$$d_i = \text{tr}_{m1}[\text{tr}_{mn,m}(\alpha^i)] = \text{tr}_{mn,1}(\alpha^i). \quad (2)$$

При формировании ГМВП на основе выражения (1) необходимо построить расширенное поле $GF(2^m)$ и поле с двойным расширением $GF[(2^m)^n]$, а также определить следы всех элементов в расширенном и простом полях, что обуславливает значительную вычислительную сложность данной процедуры.

Цель настоящей статьи — разработка алгоритма формирования ГМВП, основанного на матричном представлении последовательностей с составным периодом и использовании структурных свойств проверочных полиномов.

Формирование ГМВП осуществляется на основе М-последовательности с аналогичным периодом, построение которой может быть реализовано с помощью проверочного полинома, определяемого из таблиц неприводимых полиномов [7, 8].

Для наглядности рассмотрим сначала процедуру формирования ГМВП на конкретном примере. Пусть требуется сформировать ГМВП с периодом $N = 63$. Сначала формируем М-последовательность (МП) с таким периодом. В качестве проверочного полинома выберем произвольный примитивный полином 6-й степени, например, $h_{МП}(x) = x^6 + x + 1$. Для начального состояния 000001 линейного регистра сдвига с обратными связями длиной $L = 6$ элементы искомой М-последовательности записываются построчно в виде матрицы размерностью $[J \times S] = [7 \times 9]$:

$$F_{МП} = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 1 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 1 & 1 & 0 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 1 \\ 0 & 1 & 0 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \end{pmatrix}. \quad (3)$$

Номера строк в матрице изменяются от нуля до $(J - 1)$, а номера столбцов — от нуля до $(S - 1)$. Заметим, что столбцы матрицы, за исключением нулевого, состоящего из одних нулей, представляют собой $S - 1 = 8$ некоторых сдвигов М-последовательности с периодом $J = 7$. Данная последовательность получила название „характеристической“, а последовательность, состоящая из нулей, называется нулевой [9].

Таким образом, можно сделать вывод, что М-последовательность с составным периодом формируется на основе М-последовательности с более коротким периодом. Нулевая последовательность необходима для выполнения условия сбалансированности М-последовательности.

Проверочным полиномом для полученной в рассматриваемом примере характеристической последовательности № 1 (ХП1) с периодом $J = 7$ является полином $h_{ХП1}(x) = x^3 + x^2 + 1$. Сформируем все сдвиги этой последовательности, произвольно выбрав в качестве нулевого сдвига третий столбец матрицы $F_{МП}$ вида (3) — 0011101 (см. табл. 1).

Таблица 1

Номер сдвига	Сдвиг М-последовательности	Номер сдвига	Сдвиг М-последовательности
0	0011101	4	1101001
1	1001110	5	1110100
2	0100111	6	0111010
3	1010011		

В соответствии с табл. 1 определяем номера сдвигов характеристической последовательности для всех столбцов матрицы (3). Тогда М-последовательность с периодом $N = 63$, записанную в виде матрицы $F_{МП}$, можно определить как последовательность элементов, представляющих собой номера сдвигов характеристической последовательности с периодом $J = 7$ с одним прочерком для обозначения нулевой последовательности. В результате получим правило формирования сдвигов в виде вектора из $S = 9$ компонент:

$$I_{МП} = \{-, 2, 6, 0, 0, 3, 2, 0, 2\}. \quad (4)$$

На основе полученного правила формирования можно синтезировать ГМВ-последовательность. Для этого в качестве характеристической последовательности № 2 необходимо выбрать другую М-последовательность с периодом $J = 7$, для которого существует всего одна такая последовательность с проверочным полиномом $h_{ХП2}(x) = x^3 + x + 1$. Сформируем все сдвиги данной характеристической последовательности для нулевого сдвига 0010111 (см. табл. 2).

Таблица 2

Номер сдвига	Сдвиг М-последовательности	Номер сдвига	Сдвиг М-последовательности
0	0010111	4	0111001
1	1001011	5	1011100
2	1100101	6	0101110
3	1110010		

ГМВ-последовательность можно представить в виде матрицы $F_{ГМВ}$, аналогичной матрице (3), путем подстановки номеров сдвигов характеристической последовательности из табл. 2 в соответствии с правилом (4) (для удобства формирования последовательности данное правило повторено):

$$I_{МП} = \{-, 2, 6, 0, 0, 3, 2, 0, 2\},$$

$$F_{ГМВ} = \begin{pmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 1 \\ 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 1 & 1 & 1 & 0 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 1 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 1 & 1 & 0 & 1 & 1 & 1 \end{pmatrix}. \tag{5}$$

Возможность формирования ГМВП путем замены характеристической последовательности в правиле $I_{МП}$ можно пояснить следующим образом.

В выражении (1) значение „внутренней“ функции следа $tr_{mn,m}(\alpha) = tr_{6,3}(\alpha)$ элемента α поля с двойным расширением $GF[(2^3)^2]$ является элементом расширенного поля $GF(2^3)$. Если r принимает значение больше единицы, то возведение следа в степень $(tr_{6,3}(\alpha))^r$ означает децимацию элементов поля $GF(2^3)$ по индексу r . При этом в каждом столбце матрицы (3) также происходит децимация символов характеристической последовательности по индексу r . В случае когда двоичное представление числа r содержит одну единицу (числа 2, 4, 8 и т.д.), в результате децимации формируется циклический сдвиг М-последовательности, совпадающей с характеристической последовательностью № 1. В случае когда двоичное представление числа r содержит не менее двух единиц (числа 3, 5, 6), формируется другая „короткая“ М-последовательность, совпадающая с характеристической последовательностью № 2. Таким образом, возведение следа в степень r в выражении (1) эквивалентно замене в матричном представлении (3) характеристической последовательности № 1 на характеристическую последовательность № 2. В результате вместо М-последовательности с периодом $N = 63$ формируется ГМВ-последовательность.

В качестве примера реализации разработанного алгоритма рассмотрим процедуру формирования троичной ГМВ-последовательности с периодом $N = 80$.

1. По таблицам неприводимых полиномов [7, 10] над полем $GF[(3^2)^2]$ с характеристикой $p = 3$ выбираем примитивный полином $h_{МП}(x) = x^4 + 2x^3 + 2$ степени $k = mn = 4$, определяемой из равенства $N = 80 = 3^k - 1$.

2. На основе полинома $h_{МП}(x) = x^4 + 2x^3 + 2$ формируем троичную М-последовательность с периодом $N = 80$. Формирование выполняем с помощью рекуррентного выражения для символов М-последовательности вида $C_{4+i} = C_{3+i} + C_{0+i}$, $i = 0, 1, \dots, 75$, которое получаем на основе полинома $h_{МП}(x)$ [11]. Сформированную троичную М-последовательность записываем в виде матрицы $F_{МП}$ размерностью $[J \times S] = [8 \times 10]$ последовательно по строкам:

$$F_{МП} = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 1 & 2 & 0 & 1 \\ 2 & 1 & 1 & 2 & 1 & 2 & 0 & 2 & 0 & 2 \\ 2 & 1 & 1 & 0 & 2 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 \\ 1 & 2 & 2 & 2 & 0 & 2 & 1 & 0 & 0 & 2 \\ 0 & 0 & 0 & 2 & 2 & 2 & 2 & 1 & 0 & 2 \\ 1 & 2 & 2 & 1 & 2 & 1 & 0 & 1 & 0 & 1 \\ 1 & 2 & 2 & 0 & 1 & 0 & 2 & 2 & 0 & 0 \\ 2 & 1 & 1 & 1 & 0 & 1 & 2 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}. \quad (6)$$

3. Формируем циклические сдвиги характеристической последовательности № 1, проверочным полиномом для которой является $h_{ХП}(x) = x^2 + 2x + 2$ (см. табл. 3).

Таблица 3

Номер сдвига	Сдвиг М-последовательности	Номер сдвига	Сдвиг М-последовательности
0	02210112	4	01120221
1	20221011	5	10112022
2	12022101	6	21011202
3	11202210	7	22101120

4. Определяем номера сдвигов характеристической последовательности № 1 для всех столбцов матрицы $F_{МП}$. М-последовательность с периодом $N = 80$ определяется в виде последовательности элементов, представляющих собой номера сдвигов характеристической последовательности с периодом $J = 8$ с одним прочерком для обозначения нулевой последовательности. В результате получим правило формирования в виде вектора из $S = 10$ компонент:

$$I_{МП} = \{0, 4, 4, 2, 3, 2, 5, 7, -, 2\}. \quad (7)$$

5. По таблицам неприводимых полиномов выбираем примитивный полином $h_{ХП2}(x) = x^2 + x + 2$ степени $m = 2$, отличный от полинома $h_{ХП}(x)$. Заметим, что существует всего два примитивных полинома степени 2 над полем $GF(3^2)$. Формируем все циклические сдвиги этой характеристической последовательности № 2 для произвольно выбранного нулевого сдвига, например 02110122 (см. табл. 4).

Таблица 4

Номер сдвига	Сдвиг М-последовательности	Номер сдвига	Сдвиг М-последовательности
0	02110122	4	01220211
1	20211012	5	10122021
2	22021101	6	11012202
3	12202110	7	21101220

6. В соответствии с правилом $I_{МП}$ вида (7) столбцы матрицы $F_{МП}$ формируем на основе требуемых циклических сдвигов характеристической последовательности № 2. В результате получаем матрицу $F_{ГМВ}$, в которой искомая ГМВ-последовательность записана по строкам:

$$\mathbf{F}_{\text{ГМВ}} = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & 2 & 1 & 2 & 1 & 2 & 0 & 2 \\ 2 & 1 & 1 & 2 & 2 & 2 & 0 & 1 & 0 & 2 \\ 1 & 2 & 2 & 0 & 2 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 \\ 1 & 2 & 2 & 2 & 0 & 2 & 2 & 0 & 0 & 2 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 2 & 1 & 2 & 1 & 0 & 1 \\ 1 & 2 & 2 & 1 & 1 & 1 & 0 & 2 & 0 & 1 \\ 2 & 1 & 1 & 0 & 1 & 0 & 2 & 2 & 0 & 0 \\ 2 & 1 & 1 & 1 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}.$$

И двоичные, и недвоичные ГМВ-последовательности, алгоритм формирования которых представлен в настоящей статье, могут быть использованы в качестве синхросигналов в системах мобильной связи стандарта GSM и широкополосных сигналов в системах мобильной связи стандарта CDMA. Данные последовательности могут также найти применение в качестве псевдослучайных последовательностей для расширения спектра информационного сигнала в помехозащищенных системах спутниковой связи и для формирования широкополосных сигналов различного функционального типа в спутниковых навигационных системах. При этом структурная скрытность ГМВ-последовательностей в два раза превышает этот показатель для М-последовательностей.

Разработанный алгоритм позволяет существенно уменьшить вычислительную сложность процедуры формирования ГМВП (на 3—6 дБ для последовательностей с периодом $N=63 - 255$) благодаря отсутствию необходимости производить вычисления в конечных расширенных полях.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Варакин Л. Е. Системы связи с шумоподобными сигналами. М.: Радио и связь, 1985. 384 с.
2. Ипатов В. П. Периодические дискретные сигналы с оптимальными корреляционными свойствами. М.: Радио и связь, 1992. 152 с.
3. Свердлик М. Б. Оптимальные дискретные сигналы. М.: Сов. радио, 1975. 200 с.
4. Блейхут Р. Э. Быстрые алгоритмы цифровой обработки сигналов: Пер. с англ. М.: Мир, 1989. 488 с.
5. Прокис Дж. Цифровая связь / Пер. с англ.; Под ред. Д. Д. Кловского. М.: Радио и связь, 2000. 788 с.
6. Скляр Б. Цифровая связь. Теоретические основы и практическое применение: Пер. с англ. М.: Изд. дом „Вильямс“, 2003. 1104 с.
7. Питерсон У., Уэлдон Э. Коды, исправляющие ошибки / Пер. с англ.; Под ред. Р. Л. Добрушина и С. И. Самойленко М.: Мир, 1976. 596 с.
8. Стародубцев В. Г., Павлов О. А. Помехоустойчивые коды в телекоммуникационных и информационных системах. Вып. 1. Конечные поля Галуа: элементы теории и практики: Учеб. пособие. СПб: ВКА им. А. Ф. Можайского, 2003. 252 с.
9. Стародубцев В. Г. Алгоритм формирования и свойства дискретных редесимированных последовательностей для помехозащищенных систем связи // Сб. статей науч.-техн. конф. „Радио- и волоконно-оптическая связь, навигация, локация“. Воронеж, 1997. С. 238—246.
10. Кларк Дж., Кейн Дж. Кодирование с исправлением ошибок в системах цифровой связи: Пер. с англ. М.: Радио и связь, 1987. 392 с.
11. Блейхут Р. Э. Теория и практика кодов, контролируемых ошибки: Пер. с англ. М.: Мир, 1986. 576 с.

Сведения об авторе

Виктор Геннадьевич Стародубцев — канд. техн. наук; ООО „Мультисервисные сети и телекоммуникации“, Санкт-Петербург; начальник отдела; E-mail: vgstarod@mail.ru

Рекомендована кафедрой
сетей и систем связи космических комплексов
ВКА им. А. Ф. Можайского

Поступила в редакцию
18.01.12 г.

Ю. А. БАЛОШИН, М. В. МЕХРЕНЬГИН, А. В. АРСЕНЬЕВ, А. А. СОРОКИН

ЭЛЕКТРОДИНАМИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ВЧ-БЛИЖНЕПОЛЬНОГО ЗОНДИРОВАНИЯ БИОЛОГИЧЕСКИХ ОБЪЕКТОВ

Рассмотрена электродинамическая модель ВЧ-ближнепольного зондирования биологических объектов (на примере исследования активности ростковых зон опорно-двигательного аппарата подростков). Показано, что при исследовании биообъекта информационный сигнал зависит не только от его диэлектрической проницаемости, но и от проводимости.

Ключевые слова: электродинамическая модель, ВЧ-ближнепольное зондирование, диэлектрическая проницаемость, информационный сигнал, проводимость.

Введение. В работе [1] была рассмотрена качественная электродинамическая модель ВЧ-ближнепольного зондирования физических объектов. Анализ результатов этой работы позволил сделать важное заключение, а именно: полноценную информацию о внутренних свойствах объекта можно получать с его поверхности, сканируя ее высокочастотным электромагнитным полем малой резонансной антенны, входящей в колебательный контур генератора ближнепольной системы. Отклик этой антенны (информационный сигнал в виде изменения частоты $\delta\omega$ генератора) определяется возмущениями ее квазистационарного (ближне-го) поля этой и соответственно собственного импеданса антенны, которые, в свою очередь, определяются значением импеданса поверхности объекта, связанным с процессами внутри него. Эта непротиворечивая империческая гипотеза может быть положена в основу новых способов изучения объектов различной природы.

Среди многообразия возможных приложений в настоящей статье рассматривается метод ВЧ-ближнепольного зондирования биообъектов в задачах медицинской диагностики, позволяющий контролировать функциональную активность тканей и органов таких объектов.

Обратившись к известным работам, определяющим электрическую систему регуляции жизнедеятельности сложных многоклеточных организмов как одну из самых важных наряду с вегетативно-нервной и эндокринной системами [2—4], можно выделить следующие факторы, существенные для исследуемой электродинамической модели.

1. Процессы метаболизма, протекающие в клетках живой ткани, связаны с появлением и переносом электрических зарядов (свободных либо связанных).

Известны два типа движения зарядов в электрических полях. Постоянное электрическое поле вызывает движение зарядов в биотканях, называемое электрофорезом. В электромагнитных полях различной частоты наблюдается движение клеток, называемое диэлектрофорезом. Механизм такого движения определяется взаимодействием дипольных моментов клеток (собственных или наведенных) с внешним полем. Результатом этого взаимодействия, при условии, что частота ω электромагнитного поля превышает характеристическую частоту релаксации дипольных моментов клеток, являются значимые изменения электродинамических характеристик живых биологических тканей (диэлектрической проницаемости ϵ и удельной проводимости σ), т.е. возникновение зон дисперсии. Анализ биомедицинских технологий исследования биообъектов в интервале частот электромагнитного поля от 10^3 до 10^9 Гц показал, что появление таких зон наблюдается в диапазоне частот 2—10 МГц [3].

2. Качество процессов жизнедеятельности организма (норма или патология) влияет на его электродинамические параметры ϵ и σ . Кроме того, для получения объективной информации об объекте при воздействии на него диагностического электромагнитного поля энергия этого поля не должна влиять на процессы электрической регуляции в биообъекте: уро-

вень энергии диагностического поля не должен значительно превышать тепловую энергию биообъекта ($\approx kT$), где $T=310\text{ К}$ ($\approx 36,6 - 37\text{ }^\circ\text{C}$)).

Учитывая вышеизложенное, перейдем к анализу электродинамической модели ВЧ-ближнепольного зондирования биологических объектов.

Электродинамическая модель. Попытки создания такой модели для человека или отдельных его органов производились неоднократно (см., например, работы [2, 5]). При этом выбор модели определялся, прежде всего, диапазоном частот электромагнитного поля, взаимодействующего с биообъектом.

Здесь можно условно выделить два подхода:

— радиофизический (ВЧ-, СВЧ-электромагнитные волны с частотой от 10^3 до 10^{11} — 10^{12} Гц);

— оптический (частоты 10^{12} Гц и более).

В рассматриваемой задаче частота электромагнитного поля малой антенны выбрана равной 4 МГц (ВЧ-частота, соответствующая среднему значению области дисперсии биологических объектов). На этой же частоте работает диагностический комплекс ВЧ-ближнепольного зондирования [1], аналог которого был использован в Восстановительном центре детской ортопедии и травматологии (ВЦДОиТ, Санкт-Петербург) для исследования функциональной активности ростковых зон опорно-двигательного аппарата подростков.

Схема ВЧ-ближнепольного зондирования живого организма для рассматриваемой задачи приведена на рис. 1 (*a* — общая схема, *b* — геометрия антенны).

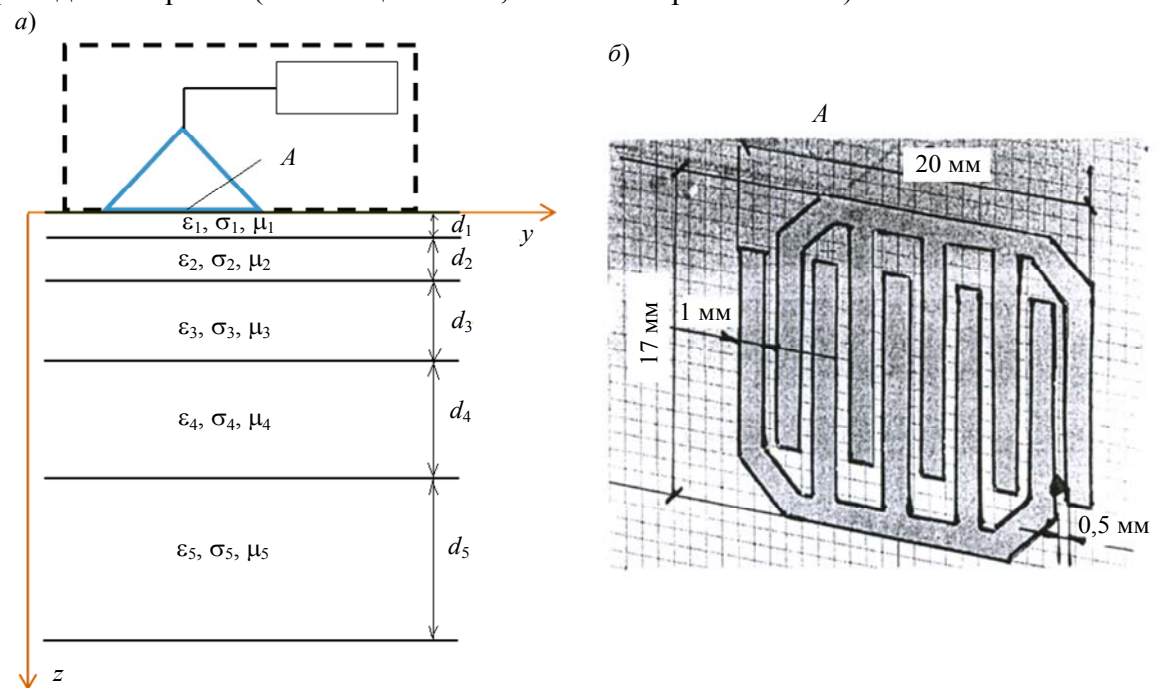


Рис. 1

Модель самого организма представлена здесь в виде полупространства ($z \leq 0$), разделенного на отдельные слои, каждый из которых характеризуется совокупностью электродинамических параметров (ϵ, σ, μ). Такое представление живого организма рассматривается во многих работах, посвященных взаимодействию организма с электромагнитным полем (см. например, [5]).

Отличием исследуемой модели от известных из литературы является количество слоев (пять), представляющих собой упрощенную модель кожно-мышечного покрова над костным слоем (слой № 5) нижних конечностей, в котором располагаются ростковые зоны. Именно нижние конечности подростков были предметом исследования функциональной активности ростковых зон с помощью метода ВЧ-ближнепольного зондирования.

Непосредственное решение задачи ВЧ-ближнеполюсного зондирования выбранной модели живого организма включает следующие шаги.

1. Определение квазистационарного поля (поля в ближней зоне) малой антенны и ее импеданса в воздухе.

2. Определение общего импеданса многослойной структуры (см. рис. 1, а) и его вариации в зависимости от изменений электродинамических характеристик ϵ и σ отдельных слоев. Такими изменениями можно на макроуровне моделировать изменения процессов в органах живого организма (от нормы до патологии). Что касается магнитной проницаемости μ_i , $i=1\dots5$, то для всех слоев, которые можно считать парамагнетиками [3], она была положена равной 1.

3. Определение влияния исследуемой среды (ее импеданса) на импеданс антенны в ее квазистационарном поле и соответственно на общий импеданс колебательного резонансного контура генератора (куда включена антенна), в результате которого и формируется информационный сигнал в виде изменения частоты генератора на величину $\delta\omega$.

Для решения задачи был использован специальный сертифицированный пакет программ CST Studio Suite 2011.

Исходные данные для расчета следующие: ВЧ-малая антенна (ее геометрические размеры показаны на рис. 1, б); общая емкость антенны $C_A = 5,4 \cdot 10^{-12}$ Ф; частота электромагнитного поля антенны, находящейся в воздухе (частота резонансного контура генератора) $4 \cdot 10^6$ Гц; полная индуктивность контура генератора $L = 11,5 \cdot 10^{-3}$ Гн. Значения электродинамических параметров ϵ и σ слоев биотканей с учетом дисперсии взяты из работ [3, 6], для частоты $4 \cdot 10^6$ Гц они приведены в таблице, там же указаны толщины слоев d .

Номер слоя	ϵ	σ , См/м	d , см
1 — эпидермис	3	$3 \cdot 10^{-5}$	$1,5 \cdot 10^{-2}$
2 — кожа	670	0,4	0,1
3 — жир	68	0,15	1
4 — мышцы	180	0,35	2,5
5 — кость	72	0,05	3

Результаты расчетов и их анализ.

ВЧ-антенна, находящаяся в воздухе. На рис. 2 приведены результаты расчетов квазистационарного поля ВЧ-антенны, находящейся в воздухе: а — распределение поля на апертуре r антенны; б — распределение поля на апертуре антенны на расстоянии 1 мм от самой антенны; в, г — общая картина поля в ближней зоне.

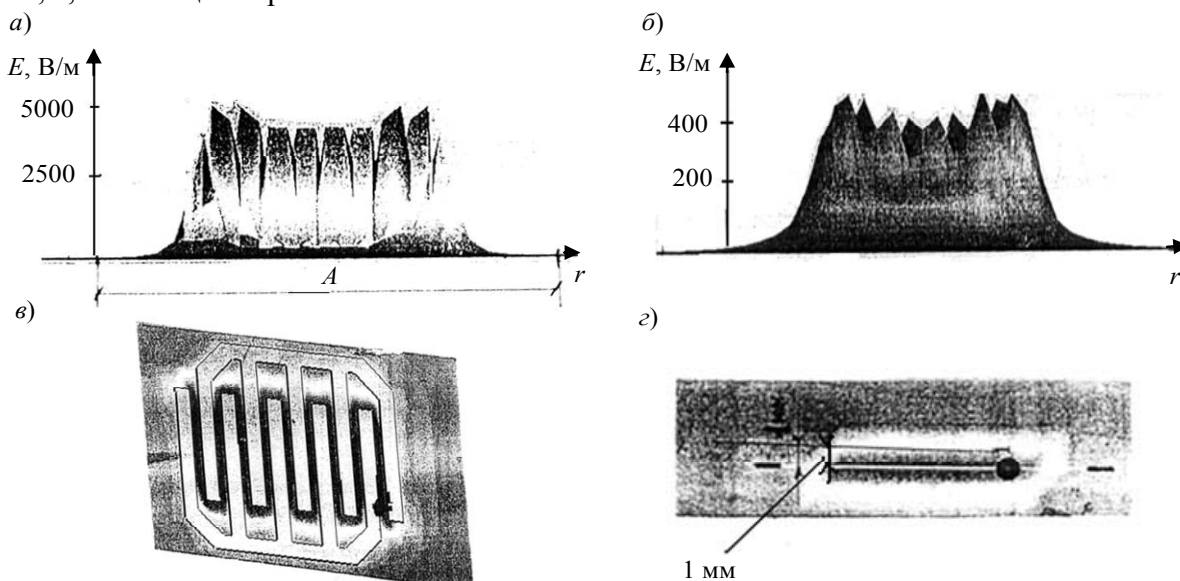


Рис. 2

К основным особенностям этого поля можно отнести следующее:

— поле сосредоточено на апертуре самой антенны, оно практически исчезает на расстояниях 0,7—1 мм от антенны и ее краев; такое распределение поля в ближней зоне на самой антенне полностью отвечает основной гипотезе ВЧ-ближнепольного зондирования: как поверхностного зондирования при непосредственном контакте антенны с исследуемым объектом;

— амплитуда поля в ближней зоне на антенне неоднородна, эта неоднородность значительно уменьшается на расстояниях 0,7—1 мм от антенны, т.е. на расстояниях эффективного поля в ближней зоне.

ВЧ-ближнепольное зондирование. Как было отмечено выше, информационным сигналом ВЧ-ближнепольного зонда является величина $\delta\omega = \omega_0 - \omega_1$, где ω_0 — частота контура генератора с антенной, находящейся в воздухе, ω_1 — частота этого же контура при контакте ВЧ-антенны с выбранным участком биообъекта. Частоту ω_0 легко можно определить по резонансной кривой тока (или напряжения), если значения R_k , L и C_A остаются постоянными в контуре (для антенны в воздухе). Однако определение ω_1 в каждой точке биообъекта (при контакте антенны с этой точкой) связано с некоторыми трудностями.

На рис. 3 а, б соответственно приведены результаты численного расчета активного сопротивления R_k , общего реактанса X_k и фазовой характеристики φ контура с ВЧ-антенной, находящейся в воздухе, и при контакте антенны с биообъектом.

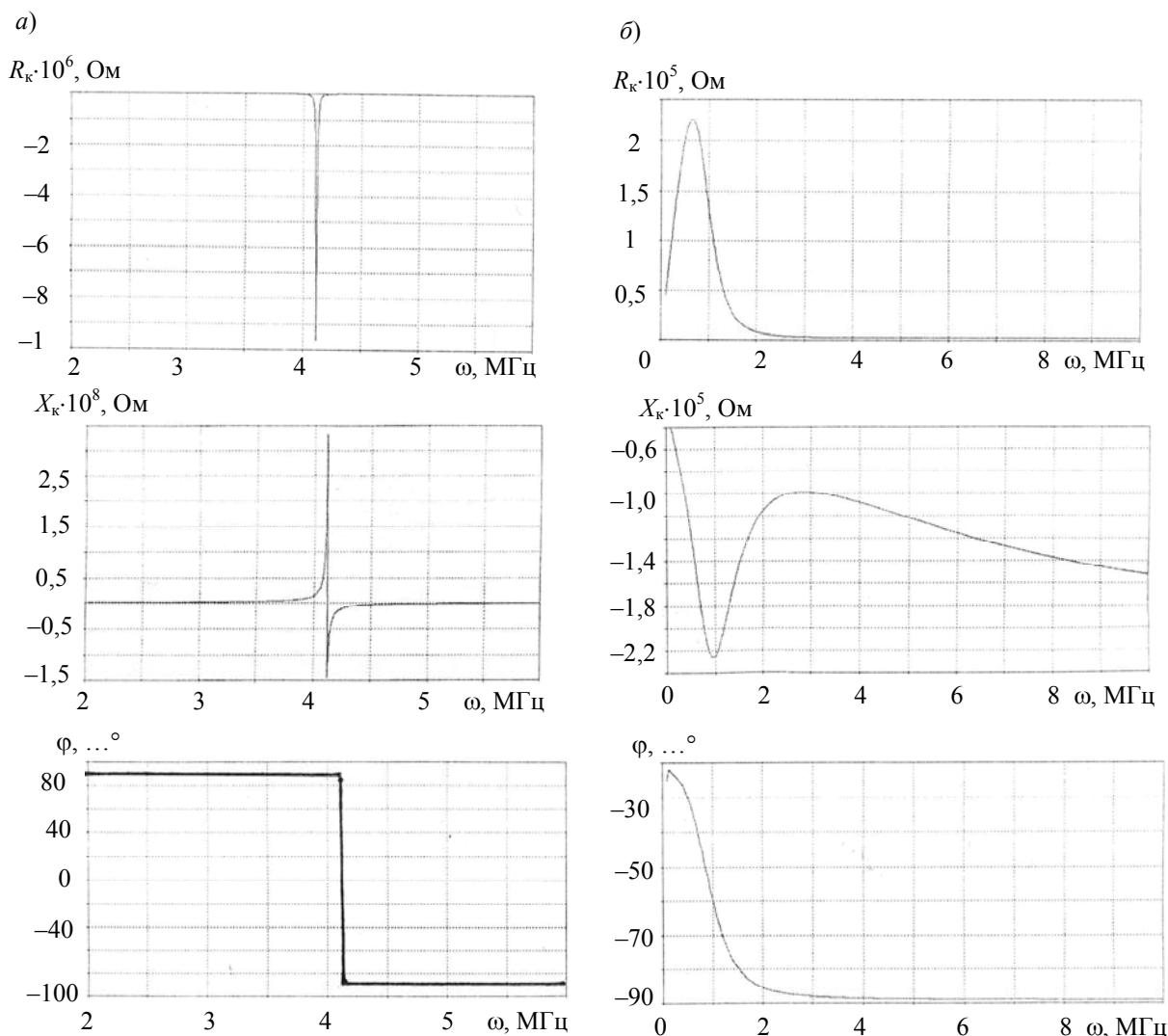


Рис. 3

При анализе резонансной кривой такого контура необходимо учитывать следующее:

— активное сопротивление R_k зависит от частоты;

— емкость контура будет переменной при контакте антенны с биообъектом в различных точках.

Таким образом, в отличие от контура с антенной, находящейся в воздухе, где резонансная кривая является функцией только частоты ω , для случая, представленного на рис. 1, резонансная кривая контура будет определяться тремя взаимосвязанными переменными $R(\omega)$, ω и C_A .

Частоту ω_1 и информационный сигнал $\delta\omega = \omega_0 - \omega_1$ можно определить по совокупности результатов, представленных на рис. 3, не обращая к анализу выражения для резонансной кривой контура. Приведенные графики являются, по существу, системой уравнений, которые заданы дискретно по точкам и в которых неизвестными являются частота ω_1 и емкость антенны C_A .

Каждая такая точка реального биообъекта характеризуется своими значениями параметров ε и σ в различных слоях. Как отмечалось выше, изменяя эти параметры в определенных пределах, можно моделировать уровень активности в тканях биообъекта. На рис. 4 в качестве примера приведены сравнительные результаты клинических исследований активности ростковых зон подростков (на ноге), полученные с помощью диагностического комплекса [7] в ВЦДОиТ, и расчетов уровней информационного сигнала (частота ω_1) с использованием рассматриваемой модели.

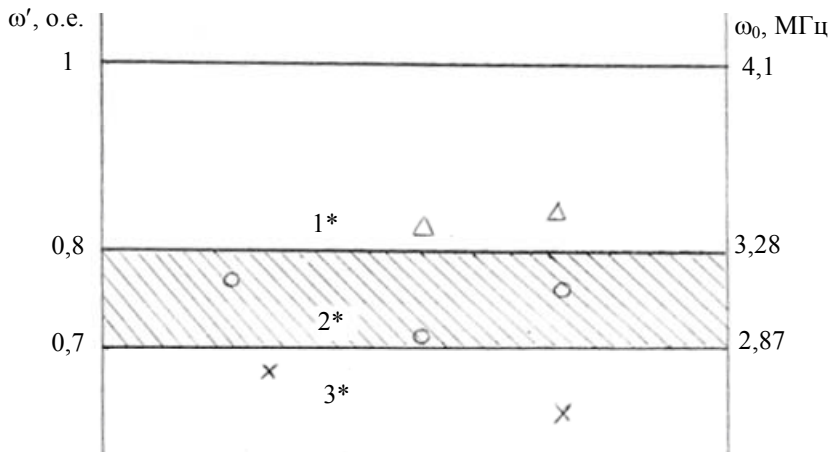


Рис. 4

Здесь уровень ω' , равный единице, соответствует частоте $\omega_0 = 4,1$ МГц контура с антенной, находящейся в воздухе, для выбранной конструкции (см. рис. 1, б) при $L = 11,5 \cdot 10^{-3}$ Гн. Заштрихованная область между уровнями 0,8 (3,28 МГц) и 0,7 (2,87 МГц) соответствует „норме“, т.е. уровням активности ростковых зон для условно здоровых детей, у которых нет отклонений в развитии опорно-двигательного аппарата. Точки, отмеченные на рис. 4 как „о“, „Δ“ и „×“, соответствуют уровню сигналов, полученных при обследовании пациентов с помощью диагностического комплекса ВЧ-ближнепольного зондирования: „о“ — норма, „×“ — увеличенная активность, „Δ“ — уменьшенная активность. На этом же рисунке указаны три расчетные точки: точка 2*, соответствующая „норме“, получена путем расчета по данным таблицы; точка 3* соответствует решению задачи, в которой диэлектрическая проницаемость ε_5 пятого слоя, относящегося к области конечности, увеличена по сравнению с табличными данными на 40 %; точка 1* соответствует решению, при котором значение ε_5 уменьшено на 40 %.

Заключение. Представленный материал позволяет сделать следующие выводы.

Рассмотренная электродинамическая модель качественно подтвердила диагностические возможности метода ВЧ-ближнепольного зондирования, использование которого позволяет по поверхностному зондированию биообъекта получать информацию о процессах, происходящих внутри него.

Активность биологических тканей характеризуется их диэлектрической проницаемостью ϵ и ее изменением под влиянием процессов, происходящих в биообъекте: увеличение значения ϵ ведет к увеличению активности, и наоборот, снижение ϵ — к уменьшению активности. Этот вывод можно считать предварительным, так как кроме диэлектрической проницаемости ϵ существенный вклад в активность клеток биотканей, исходя из роли электрической регуляции жизнедеятельности биообъекта, может вносить проводимость σ .

С помощью рассмотренной модели могут быть решены и другие аналогичные задачи, так как ее использование позволяет при оценке информационного сигнала учитывать изменение электродинамических характеристик ϵ и σ в различных слоях биотканей под действием процессов метаболизма в биообъекте при его диагностике.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Балашин Ю. А., Сорокин А. А., Волченко А. Н. Электродинамическая модель ВЧ-ближнепольного зондирования физических объектов // Изв. вузов. Приборостроение. 2011. Т. 54, № 12. С. 68—74.
2. Электрическая система регуляции процессов жизнедеятельности / Под ред. Г. Н. Зацепиной. М.: Изд-во МГУ, 1992. 160 с.
3. Самойлов В. О. Медицинская биофизика. СПб: Спецлит, 2007. 560 с.
4. Гильберт С. Биология развития. М.: Мир, 1995. 352 с.
5. Кинг Р. Антенны в материальных средах. М: Мир, 1984. 824 с.
6. Foster K. R., Schan H. P. Dielectric properties of tissues and biological material: a critical review // Crit. Rev. Biomed. Eng. 1989. Vol. 17. P. 25—104.
7. Балашин Ю. А., Сорокин А. А., Арсеньев А. В., Дудин М. Г., Волченко А. Н. Метод диагностики функциональной активности тканей и органов биообъектов и устройство для его реализации // Изв. вузов. Приборостроение. 2011. Т. 54, № 3. С. 37—43.

Сведения об авторах

- Юрий Александрович Балашин** — д-р техн. наук, профессор; Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, кафедра физики; E-mail: baloshin1940@mail.ru
- Михаил Викторович Мехреньгин** — студент; Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, кафедра физики и техники оптической связи; E-mail: mehrengin@gmail.com
- Алексей Валентинович Арсеньев** — канд. мед. наук; ГУЗ Восстановительный центр детской ортопедии и травматологии „Огонек“, кафедра детской ортопедии и травматологии, Санкт-Петербург; зав. IV клиническим отделением; E-mail: stivamat@rambler.ru
- Анатолий Александрович Сорокин** — канд. техн. наук, доцент; Балтийский государственный технический университет „ВОЕНМЕХ“ им. Д. Ф. Устинова, кафедра радиоэлектронных систем управления, Санкт-Петербург; E-mail: an_sor@mail.ru

Рекомендована кафедрой физики НИУ ИТМО

Поступила в редакцию 12.03.12 г.

ПРИБОРЫ И СИСТЕМЫ АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ

УДК 519.688

М. М. БЕЗРЯДИН, Г. И. ЛОЗГАЧЕВ

ПОСТРОЕНИЕ МОДАЛЬНОГО РОБАСТНОГО РЕГУЛЯТОРА ПРИ ВОЗМУЩАЮЩИХ И ЗАДАЮЩИХ ВОЗДЕЙСТВИЯХ

Рассматривается проблема построения модального регулятора на основе критерия, обеспечивающего оптимальное соотношение между качеством управления системой и ее робастными свойствами.

Ключевые слова: алгоритм, модальный регулятор, робастность, качество.

Одна из наиболее актуальных задач современной теории автоматического управления — компенсация внешних возмущений, влияющих на работу системы управления объектами.

В работах [1—4] предложен алгоритм построения регулятора для свободного движения. В настоящей статье рассматривается метод построения модальных робастных регуляторов при наличии задающих и возмущающих воздействий, при этом предполагается, что задающее и возмущающее воздействие имеют волновую структуру [5]. Данный метод распространяется на системы любого порядка, но в отличие от методов, рассмотренных в работах [6, 7], его математический аппарат достаточно прост и сводится к элементарному делению полиномов.

Метод синтеза регулятора. Рассмотрим замкнутую систему автоматического управления, структурная схема которой представлена на рис. 1.

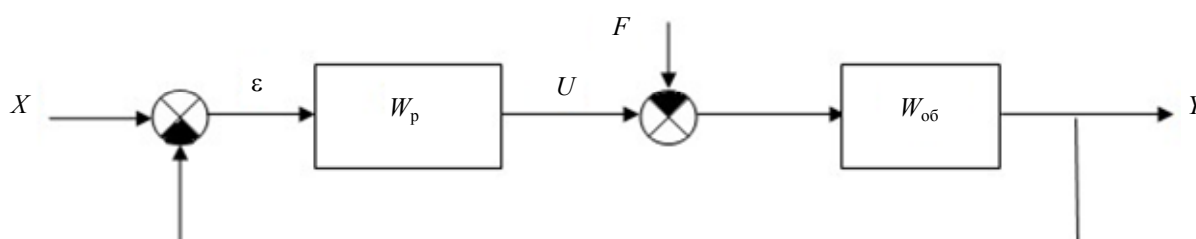


Рис. 1

Пусть задана передаточная функция объекта

$$W_{об}(p) = \frac{P_1(p)}{P_2(p)},$$

где $P_1(p)$ и $P_2(p)$ — полиномы степени m и n , $m \leq n$.

Задающее воздействие характеризуется следующим выражением:

$$X(p) = \frac{R_1(p)}{R_2(p)},$$

где $R_1(p)$ и $R_2(p)$ — полиномы степени q и r , а внешнее возмущение — выражением

$$F(p) = \frac{G_1(p)}{G_2(p)},$$

где $G_1(p)$ и $G_2(p)$ — полиномы степени g_1 и g_2 .

Пусть задана передаточная функция замкнутой системы в виде частного двух полиномов $Q_1(p)$ и $Q_2(p)$:

$$W_{з.с}(p) = \frac{Q_1(p)}{Q_2(p)},$$

где $Q_1(p)$ и $Q_2(p)$ — полиномы степени l и k , $l \leq k$.

Полином $Q_2(p)$ будем считать требуемым. Полином $Q_1(p)$ задан с точностью до коэффициентов, которые определяются в процессе построения передаточной функции регулятора.

Ошибка управления может быть представлена выражением

$$\varepsilon(p) = X(p) - Y(p) = X(p) - (U(p) + F(p))W_{об}(p).$$

Введем в рассмотрение полиномы $L_1, L_2, N_{ост}, L_{ост}, T_1, T_{ост}, S_1, S_{ост}$:

$$\frac{Q_2(p) - Q_1(p)}{P_2(p)} = L_2(p) + \frac{N_{ост}(p)}{P_2(p)};$$

$$\frac{Q_1(p)}{P_1(p)} = L_1(p) + \frac{L_{ост}(p)}{P_1(p)};$$

$$\frac{Q_2(p) - Q_1(p)}{R_2(p)} = T_1(p) + \frac{T_{ост}(p)}{R_2(p)};$$

$$\frac{L_2(p)}{G_2(p)} = S_1(p) + \frac{S_{ост}(p)}{G_2(p)},$$

тогда

$$\varepsilon(p) = \frac{Q_2(p) - Q_1(p)}{Q_2(p)} X(p) - \frac{P_1(p)L_2(p)}{Q_2(p)} F(p).$$

Если исходная динамическая система является полностью управляемой и наблюдаемой, т.е. передаточная функция объекта $W_{об}(p)$ представляет собой несократимую дробь, и выполняется условие $k \geq (2n-1) + r + g_2$, то всегда найдутся коэффициенты полинома $Q_1(p)$, при которых происходит деление без остатка: $Q_2(p) - Q_1(p)$ на $P_2(p)$, $Q_2(p) - Q_1(p)$ на $R_2(p)$ и $Q_1(p)$ на $P_1(p)$. При этом существует передаточная функция регулятора, обеспечивающая воспроизведение задающего воздействия без остаточной ошибки и желаемое расположение корней характеристического полинома [1—3]:

$$W_p(p) = \frac{L_1(p)}{L_2(p)}.$$

Для построения регулятора сформируем критерий, обеспечивающий необходимое соотношение между качеством управления системой и ее робастными свойствами:

$$I = \beta_1 \int_0^{\infty} (\varepsilon(t)^2 + K\dot{\varepsilon}(t)^2) dt + \beta_2 \frac{1}{\rho}, \quad (1)$$

где K — некоторое число, ρ — мера робастности, β_1 и β_2 — весовые коэффициенты.

Первое слагаемое в уравнении (1) представляет собой интегральный критерий качества, а второе слагаемое характеризует робастные свойства системы.

Зададим характеристический полином замкнутой системы с коэффициентами в виде параметров. Используя алгоритм, описанный в работе [8], можно получить регулятор, коэффициенты которого будут выражены через коэффициенты требуемого полинома. Минимизация критерия (1) позволяет найти значения коэффициентов характеристического полинома, обеспечивающие желаемое соотношение между робастными свойствами системы и качеством управления.

Для систем небольшой размерности, а также в случае если передаточная функция объекта имеет один параметр, критерий может быть выражен в явной форме. Иначе необходимо применить численные методы оптимизации.

Вычисление меры робастности системы. Пусть R_n — множество многочленов степени n над полем действительных чисел. Пусть передаточная функция объекта задана в виде

$$W_{об}^*(p) = \frac{P_1^*(p)}{P_2^*(p)}, \quad (2)$$

где $P_1^* \in R_m$, $P_2^* \in R_n$ и $m \leq n$; P_1^* и P_2^* содержат параметрическую неопределенность, заданную в виде

$$\underline{l}_i \leq q_i^* - q_i \leq \bar{l}_i,$$

где q_i — заданные номинальные значения параметров, q_i^* — реальные значения параметров, \underline{l}_i и \bar{l}_i — пределы возможных погрешностей определения i -го параметра, $i = \overline{1, s}$, $s \leq n + m$.

Необходимо найти передаточную функцию регулятора, обеспечивающего устойчивость замкнутой системы с передаточной функцией

$$W_{з.с}(p) = \frac{W_{об}^*(p)W_p(p)}{1 + W_{об}^*(p)W_p(p)}$$

при максимальном значении критерия робастности. В качестве такого критерия можно принять $\gamma = \min(\bar{l}_i - \underline{l}_i)$ или $\mu = \sum_{i=1}^s \delta_i (\bar{l}_i - \underline{l}_i)$, где δ_i — весовые коэффициенты, $i = \overline{1, s}$, $s \leq n + m$.

В качестве критерия робастности можно также выбрать объем (в общем случае n -мерный) области устойчивости системы.

Представим передаточную функцию объекта управления (2) в виде

$$W_{об}^*(p) = \frac{P_1^*(p) + \Delta P_1(p)}{P_2^*(p) + \Delta P_2(p)},$$

где $\Delta P_1(p)$ и $\Delta P_2(p)$ — полиномы, содержащие неопределенность.

В этом случае характеристический полином замкнутой системы

$$D(p) = Q_2(p) + \Delta P_1(p)L(p) + \Delta P_2(p)N(p). \quad (3)$$

Обозначим коэффициенты полинома $D(p)$ через b_i , $i = \overline{0, k}$, тогда

$$D(p) = b_0 p^k + b_1 p^{k-1} + \dots + b_{k-1} p + b_k.$$

Коэффициенты b_i представляют собой функции от коэффициентов a_i , $i = \overline{0, k}$, полинома Q_2 и параметров полиномов $\Delta P_1(p)$ и $\Delta P_2(p)$.

Обозначим через $u_j = (a_1^j, a_2^j, \dots, a_{k-1}^j, a_k^j)$ совокупность коэффициентов полинома Q_2 .

Используя численные методы, можно найти значения $a_1^j, a_2^j, \dots, a_{k-1}^j, a_k^j$, обеспечивающие максимальное или требуемое значение любого из перечисленных критериев. Например, для вычисления критерия $\gamma = \min(\bar{l}_i - \underline{l}_i)$ можно воспользоваться методом, предложенным в работе [9].

Пример. Пусть передаточная функция объекта задана в виде

$$W_{об}(p) = \frac{-Kp + 1}{Tp + 1}.$$

Внешнее воздействие представлено единичным скачком.

Зададим передаточную функцию замкнутой системы в виде

$$W_{з.с}(p) = \frac{Q_1(p)}{Q_2(p)} = \frac{d_0 p^2 + d_1 p + d_2}{p^2 + a_1 p + a_2}.$$

В качестве расчетных значений примем $K = 1$, $T = 1$. Используя программу, описанную в работе [8], получим выражения для передаточной функции регулятора, при котором характеристический полином замкнутой системы будет равен $Q_2(p)$:

$$W_p(p) = \frac{p(-1 + a_1 + a_2) + a_2}{p(1 + a_1 + a_2)}.$$

Квадратичный критерий качества, выраженный через коэффициенты a_i характеристического полинома, определяется как

$$I = \frac{(1 + a_1 + a_2)^2 ((1 + a_1)^2 - 2a_1 a_2 + a_2^3)}{8a_1 a_2}.$$

Зададим приращение параметрам объекта: $K = 1 + \Delta K$, $T = 1 + \Delta T$, при этом

$$W_{об}(p) = \frac{-p + 1 - \Delta K p}{p + 1 + \Delta T p}.$$

Согласно выражению (3) характеристический полином системы с обратной связью

$$D(p) = p^2 (1 + \Delta T (1 + a_1 + a_2) + \Delta K (-1 + a_1 + a_2)) + p(a_1 + \Delta K a_2) + a_2.$$

Используя условие устойчивости системы, получаем

$$\Delta K > -\frac{a_1}{a_2}, \quad \Delta T > -1 - \Delta K (-1 + a_1 + a_2).$$

Минимизируем функционал I . Для этого определим минимум интегрального критерия. При $a_1 \geq 0, a_2 \geq 0$ получим $a_1 = 0,66$ и $a_2 = 0,85$. Используя эти значения как начальные, можем производить настройку робастных свойств системы. Переходный процесс в системе при единичном воздействии и $a_1 = 0,66, a_2 = 0,85$ представлен на рис. 2.

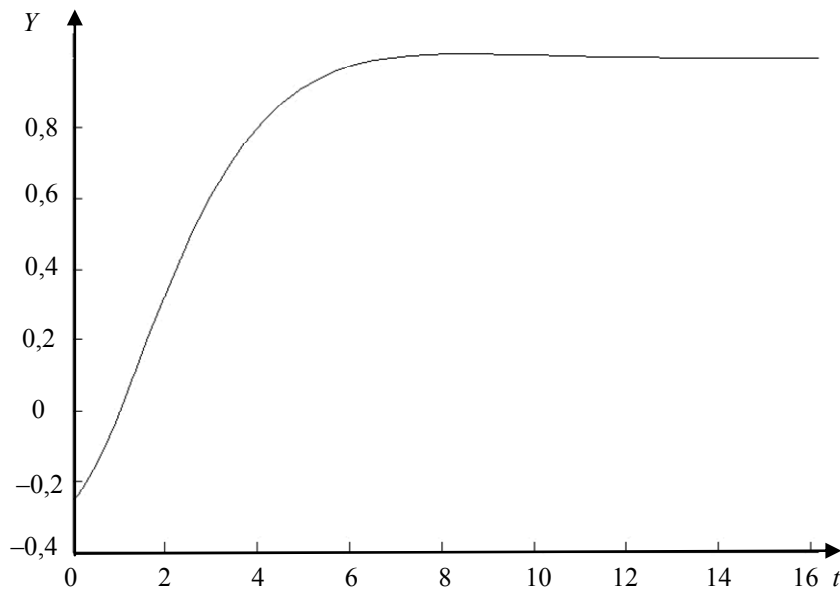


Рис 2.

Рассмотренный метод построения модального робастного регулятора благодаря алгоритмической простоте достаточно удобен для реализации на компьютере. К достоинствам этого метода можно также отнести возможность получения регулятора в общем виде, что позволяет производить оптимизацию характеристик системы непосредственно по коэффициентам характеристического полинома замкнутой системы.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Лозгачев Г. И. Синтез модальных регуляторов по передаточной функции замкнутой системы // *АиТ*. 1995. № 5. С. 49—55.
2. Лозгачев Г. И. Построение модальных регуляторов для одноконтурных и многосвязных систем // *АиТ*. 2000. № 12. С. 15—21.
3. Дылевский А. В., Лозгачев Г. И. Синтез линейных систем управления с заданным характеристическим полиномом // *Изв. РАН. Сер. Теория и системы управления*. 2003. № 5. С. 17—20.
4. Лозгачев Г. И., Безрядин М. М. Проблема соотношения робастности и качества управления при построении модальных регуляторов // *Кибернетика и высокие технологии XXI века: XII Междунар. науч.-техн. конф.*, 11—12 мая 2011г. Воронеж, 2011. Т. 2. С. 412—416.
5. Фильтрация и стохастическое управление в динамических системах / Под ред. К. Т. Леондеса. М.: Мир, 1980. 408 с.
6. Bhattacharyya S. P., Chapellat H., Keel L. Robust control: the parametric approach // Upper Saddle River. N. J.: Prentice Hall, 1995.
7. Coddard P. J., Clover K. Controller approximation approaches for preserving H^∞ performance // *IEEE Trans. Automat. Control*. 1998. Vol. 43, N 7. P. 858—871.
8. Лозгачев Г. И., Безрядин М. М. Программная реализация алгоритма построения модального робастного регулятора по передаточной функции замкнутой системы в случае наличия возмущающего воздействия // *Вестн. ВГУ. Системный анализ и информационные технологии*. 2010. № 2. С. 50—52.
9. Воронов А. А. Введение в динамику сложных управляемых систем. М.: Наука, 1985.

*Сведения об авторах***Михаил Михайлович Безрядин**— аспирант; Воронежский государственный университет, кафедра технической кибернетики и автоматического регулирования;
E-mail: maickel@yandex.ru**Геннадий Иванович Лозгачев**

— д-р техн. наук, профессор; Воронежский государственный университет, кафедра технической кибернетики и автоматического регулирования; E-mail: Prof-lozgachev@yandex.ru

Рекомендована кафедрой
технической кибернетики и
автоматического регулированияПоступила в редакцию
06.12.11 г.

УДК 681.513.54:629.7.015

В. В. МАЛЫШЕВ, Д. С. КАБАНОВ

**АЛГОРИТМ КОРРЕКЦИИ СТРУКТУРЫ УПРАВЛЕНИЯ
АВТОМАТИЧЕСКИМ ПОДВОДНЫМ АППАРАТОМ
ДЛЯ ПОСТРОЕНИЯ ОБЛАСТИ ДОСТИЖИМОСТИ**

Рассматривается алгоритм коррекции структуры управления автоматическим подводным аппаратом, полученной с использованием принципа максимума, для построения области достижимости. Приведены результаты численного моделирования и сравнительного анализа алгоритма с решением задачи методом Крылова — Черноусько.

Ключевые слова: принцип максимума, прогнозирующая модель, область достижимости, автоматический подводный аппарат.

При решении задач управления автоматическим подводным аппаратом в ряде случаев (например, при оценке его маневренных возможностей с учетом ограничений на перегрузки, расход топлива, скорость движения, а также при решении игровых задач о встрече движений) возникает проблема построения областей достижимости (ОД), исследованию которой посвящено множество работ (см. например, [1—3]). Построение ОД в темпе движения подводного аппарата затруднительно, так как необходимо обеспечить надежную сходимость решения двухточечных краевых задач. Для преодоления этих трудностей предлагается использовать алгоритм коррекции структуры управления [4], полученной с использованием принципа максимума [5, 6], с помощью которого вычисляются граничные точки ОД.

В настоящей статье рассматривается задача управления центром масс автоматического подводного аппарата (далее — ПА) на основе критерия, характеризующего удаление ПА на максимальное расстояние от точки старта в выбранном направлении с учетом ограничения на управление (выпуклая часть границы ОД). Полагается, что вектор состояния ПА точно известен в любой момент времени. При этом выявляется структура оптимального управления, использование которой предусматривает вычисление сигнала управления по различным формулам на соответствующих участках интервала оптимизации.

Требуется найти такую программу изменения нормальной перегрузки $n_y(t)$ [7, 8], которая позволит обеспечить за время t_f перевод ПА из начального положения в вертикальной плоскости в максимально удаленное от точки старта положение в выбранном направлении движения, заданном единичным вектором \mathbf{b} и углом ξ его наклона относительно стартовой системы координат. На величину перегрузки n_y накладывается ограничение. Построение

выпуклой части границы области достижимости автоматического ПА осуществляется путем изменения угла ξ [1, 3].

При такой формулировке требований к управляемому движению ПА становится возможным удерживать его в эксплуатационной области, которая формируется исходя из условий достижения максимальной дальности хода в выбранном направлении и обеспечения безопасности функционирования объекта управления при заданных конструктивных ограничениях на прочность ПА. В качестве управляющего воздействия (сигнала) выбирается перегрузка n_y .

Для упрощения описания алгоритма управления положим [4], что скорость ПА изменяется незначительно в процессе маневра. Уравнения движения центра масс ПА в вертикальной плоскости имеют следующий вид [7, 8]:

$$\dot{\theta} = \frac{g}{V}(n_y - \cos \theta); \quad \dot{x} = V \cos \theta; \quad \dot{y} = V \sin \theta, \quad (1)$$

где $(\theta \ x \ y)^T = \mathbf{X}$ — вектор состояния ПА; θ — угол наклона траектории ПА; x , y — продольная дальность движения и глубина погружения ПА соответственно; V — скорость ПА; g — ускорение свободного падения.

Граничные условия задачи: $\theta(0) = \theta_0$, $x(0) = x_0$, $y(0) = y_0$, где θ_0 , x_0 , y_0 — заданные величины.

При построении выпуклой части границы ОД осуществляется минимизация критерия оптимальности, характеризующего точку касания границы ОД с прямой, перпендикулярной направлению вектора \mathbf{b} [1, 3]:

$$J = F[\mathbf{X}(t_f)] = -\mathbf{b}^T \mathbf{X}(t_f) = -x(t_f) \cos \xi - y(t_f) \sin \xi, \quad (2)$$

где $\mathbf{b}^T = [0 \ \cos \xi \ \sin \xi]$.

Для формирования структуры оптимального управления обратимся к необходимым условиям оптимальности [5, 6, 9, 10]. Запишем гамильтониан для системы (1) с критерием качества (2):

$$H = \psi_\theta \frac{g}{V}(n_y - \cos \theta) + \psi_x V \cos \theta + \psi_y V \sin \theta,$$

где $(\psi_\theta \ \psi_x \ \psi_y)^T = \Psi$ — вектор сопряженных переменных [5].

В соответствии с принципом максимума сопряженные переменные определяются из уравнения $\dot{\Psi} = -\left(\frac{\partial H}{\partial \mathbf{X}}\right)^T$, или в поэлементном виде:

$$\dot{\psi}_\theta = -\psi_\theta \frac{g}{V} \sin \theta + \psi_x V \sin \theta - \psi_y V \cos \theta, \quad \dot{\psi}_x = 0, \quad \dot{\psi}_y = 0, \quad (3)$$

с граничными условиями $\Psi(t_f) = \left(\frac{\partial F[\mathbf{X}(t_f)]}{\partial \mathbf{X}}\right)^T$, а сигнал управления определяется из условия

инф $n_y \in [-n_{y_m}, n_{y_m}]$ $H(\mathbf{X}, \Psi, n_y, t) = H(\mathbf{X}, \Psi, n_{y_{oc}}, t)$. При существовании конечного интервала времени, на котором $\psi_\theta = 0$, требуется ввести „особое“ управление $n_{y_{oc}}$. Тогда

$$n_y = \begin{cases} -n_{y_m} \operatorname{sgn}(\psi_\theta) & \text{при } \psi_\theta \neq 0; \\ n_{y_{oc}} & \text{при } \psi_\theta = 0 \text{ для } t \in [\tau_1, \tau_2], \end{cases} \quad (4)$$

а „особое“ управление $n_{y_{oc}}$ согласно условию $\frac{d^2}{dt^2} \left(\frac{\partial H}{\partial n_y} \right) = 0$ [10] характеризуется выражением

$$n_{y_{oc}} = \frac{g\psi_\theta - V^2\psi_x}{g\psi_\theta \cos \theta - V^2\psi_x \cos \theta - V^2\psi_y \sin \theta}.$$

Здесь n_{y_m} — предельное значение перегрузки, $\tau_1, \tau_2 \in [0, t_f]$ — моменты, ограничивающие интервал времени нахождения ПА на траектории, соответствующей предельным углам ее наклона.

„Особое“ управление возникает в случае, когда $\psi_\theta = 0$ и $\dot{\psi}_\theta = 0$ на интервале $[\tau_1, \tau_2]$. Тогда $\dot{\psi}_\theta = \psi_x V \sin \theta - \psi_y V \cos \theta$, и с учетом уравнений (3) при граничных условиях $\psi_x(t_f) = -\cos \xi$, $\psi_y(t_f) = -\sin \xi$ получаем $V(-\cos \xi) \sin \theta + V(\sin \xi) \cos \theta = 0$, откуда $\sin(\xi - \theta) = 0$, тогда $n_{y_{oc}} = \cos \xi$.

Решение краевой задачи (1), (3), (4) методом Ньютона [4, 11, 12] связано с вычислительными трудностями, обусловленными поиском начального приближения для сопряженного вектора $\Psi(0)$ и обеспечением сходимости алгоритма при изменении граничных условий задачи оптимизации. Для преодоления этих трудностей рассмотрим следующую вспомогательную задачу оптимизации. Представим сигнал управления n_y в общем виде [4], когда возможно несколько переключений (например, два):

$$n_y = -n_{y_m} \operatorname{sgn}(\psi_{\theta_0}) + \Delta n_{y_1} l(t, \tau_1) + \Delta n_{y_2} l(t, \tau_2),$$

где $\psi_{\theta_0} = \psi_\theta(0)$, $\Delta n_{y_1} = n_{y_m} \operatorname{sgn}(\psi_{\theta_0}) + n_{y_{oc}}$, $\Delta n_{y_2} = -n_{y_{oc}} + n_{y_m} \operatorname{sgn}(\psi_{\theta_0})$, а $l(t, \tau_1)$, $l(t, \tau_2)$ — функции вида

$$l(t, t_1) = \frac{1}{2} + \frac{1}{\pi} \operatorname{arctg}(k(t - t_1)),$$

Здесь k — коэффициент, при неограниченном возрастании которого функция $l(t, t_1)$ приближается к единичной функции Хэвисайда (для задач с управлением релейного типа аналогичная структура рассмотрена в работах [5, 8, 9]).

На рис. 1 приведен график функции $l(t, t_1)$ при $t_1 = 4$, $k = 10\,000$.

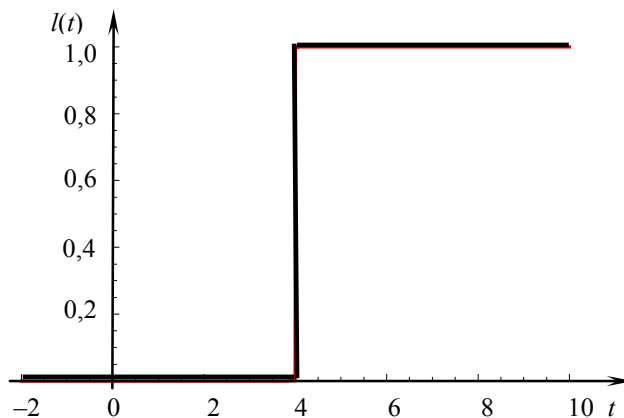


Рис. 1

Моменты переключения τ_1 и τ_2 функции $n_y(t)$ будем рассматривать в качестве компонент расширенного вектора состояния объекта, а в качестве сигналов управления выберем производные от τ_1 и τ_2 по времени. Тогда динамика объекта управления может быть представлена уравнениями

$$\dot{\theta} = \frac{g}{V} \left(-n_{y_m} \operatorname{sgn}(\psi_{\theta_0}) + \Delta n_{y_1} l(t, \tau_1) + \Delta n_{y_2} l(t, \tau_2) - \cos \theta \right), \quad (5)$$

$$\dot{x} = V \cos \theta, \quad \dot{y} = V \sin \theta, \quad \dot{\tau}_1 = w_1, \quad \dot{\tau}_2 = w_2.$$

Здесь $(w_1 \ w_2)^T = \mathbf{w}$ — вектор управления во вспомогательной задаче оптимизации. Таким образом, управление осуществляется косвенно — через вектор управления \mathbf{w} .

Для поиска оптимальной траектории движения автоматического ПА предлагается использовать алгоритм коррекции структуры управления с помощью прогнозирующей модели [5, 8, 9]. В отличие от указанных работ, в рассматриваемой в данной статье структуре управления имеется „особое“ управление $n_{y_{oc}} = \cos \xi$.

В соответствии с алгоритмом на основе прогнозирующей модели в качестве критерия оптимальности выберем функционал Красовского [5]:

$$J_1 = F[\mathbf{X}(t_f)] + \frac{1}{2} \int_0^{t_f} \mathbf{w}^T \cdot \mathbf{k}_w^{-2} \cdot \mathbf{w} dt + \frac{1}{2} \int_0^{t_f} \mathbf{w}_{\text{опт}}^T \cdot \mathbf{k}_w^{-2} \cdot \mathbf{w}_{\text{опт}} dt, \quad (6)$$

где $F[\mathbf{X}(t_f)] = -x(t_f) \cos \xi - y(t_f) \sin \xi$; $\mathbf{w}_{\text{опт}}$ — оптимальное значение вектора управления \mathbf{w} , $\mathbf{w}_{\text{опт}} = (w_{1\text{опт}} \ w_{2\text{опт}})^T$, $\mathbf{k}_w^2 = \operatorname{diag}(k_{w_1}^2, k_{w_2}^2)$, коэффициенты $k_{w_1}^2$ и $k_{w_2}^2$ определяются моделированием при отладке вычислительного алгоритма.

Введение слагаемых $\frac{1}{2} \int_0^{t_f} \mathbf{w}^T \cdot \mathbf{k}_w^{-2} \cdot \mathbf{w} dt$ и $\frac{1}{2} \int_0^{t_f} \mathbf{w}_{\text{опт}}^T \cdot \mathbf{k}_w^{-2} \cdot \mathbf{w}_{\text{опт}} dt$ в исходный критерий

оптимальности фактически не меняет требований задачи, ибо по завершении переходных процессов переключения $\tau_1(t)$, $\tau_2(t)$ имеем $\dot{\tau}_1 = 0$, $\dot{\tau}_2 = 0$, что приводит к обнулению этих слагаемых.

Запишем гамильтониан вспомогательной задачи оптимизации:

$$H = \psi_{\theta} \frac{g}{V} (n_y - \cos \theta) + \psi_x V \cos \theta + \psi_y V \sin \theta + \psi_{\tau_1} w_1 + \psi_{\tau_2} w_2 +$$

$$+ \frac{1}{2} \mathbf{w}^T \cdot \mathbf{k}_w^{-2} \cdot \mathbf{w} + \frac{1}{2} \mathbf{w}_{\text{опт}}^T \cdot \mathbf{k}_w^{-2} \cdot \mathbf{w}_{\text{опт}}.$$

Система канонических уравнений имеет следующий вид:

$$\dot{\theta} = \frac{g}{V} \left(-n_{y_m} \operatorname{sgn}(\psi_{\theta_0}) + \Delta n_{y_1} l(t - \tau_1) + \Delta n_{y_2} l(t - \tau_2) - \cos \theta \right),$$

$$\dot{x} = V \cos \theta, \quad \dot{y} = V \sin \theta, \quad \dot{\tau}_1 = 0, \quad \dot{\tau}_2 = 0,$$

$$\dot{\psi}_{\theta} = -\psi_{\theta} \frac{g}{V} \sin \theta + \psi_x V \sin \theta - \psi_y V \cos \theta, \quad (7)$$

$$\dot{\psi}_x = 0, \quad \dot{\psi}_y = 0, \quad \dot{\psi}_{\tau_1} = \psi_{\theta} \frac{g}{V} \Delta n_{y_1} \delta(t, \tau_1), \quad \dot{\psi}_{\tau_2} = \psi_{\theta} \frac{g}{V} \Delta n_{y_2} \delta(t, \tau_2),$$

где $\delta(t, \tau_1)$, $\delta(t, \tau_2)$ — функции вида

$$\delta(t, t_1) = \frac{\partial l(t, t_1)}{\partial t_1} = \frac{k}{\pi (1 + k^2 (t - t_1)^2)}.$$

Из условия трансверсальности получаем

$$\Psi^T(t_f) = \frac{\partial F[X(t_f)]}{\partial X(t_f)}$$

или в развернутом виде

$$\Psi_{\theta}(t_f) = 0, \Psi_x(t_f) = -\cos \xi, \Psi_y(t_f) = -\sin \xi, \Psi_{\tau_1}(t_f) = 0, \Psi_{\tau_2}(t_f) = 0. \quad (8)$$

Составляющие вектора управления

$$w_1(t) = -k_{w_1}^2 \Psi_{\tau_1}(\tau_1), \quad w_2(t) = -k_{w_2}^2 \Psi_{\tau_2}(\tau_2). \quad (9)$$

Алгоритм вычисления сигнала управления с использованием прогнозирующей модели состоит из следующих действий.

1. Численное интегрирование системы уравнений (7) в прямом времени на интервале $[t, t_f]$ при начальных условиях $\mathbf{X}(t), \Psi(t)$ (на первом шаге $t = 0$).

2. По найденным значениям $\mathbf{X}(t_f)$ определение граничных условий (8) для $\Psi(t_f)$ при совместном решении в обратном времени системы уравнений (7) на интервале $[t, t_f]$ для нахождения $\Psi(t)$.

3. Вычисление составляющих вектора управления (9).

4. Интегрирование системы уравнений (5) при выбранных сигналах управления на один шаг, определение нового значения $\mathbf{X}(t)$.

5. Повторение процесса вычислений начиная с п. 1 до достижения конечного момента времени t_f .

Как видно из алгоритма, для определения сигнала управления не требуется решать двухточечную краевую задачу. Вычисления сводятся к решению двух задач Коши, решаемых в прямом и обратном времени соответственно.

На рис. 2—4 приведены графики, полученные для начальных условий движения ПА: $\xi = 20^\circ$, $V = 30$ м/с, $\theta_0 = 0$, $x_0 = 0$, $y_0 = -100$ м, $\tau_1 = 1$ с, $\tau_2 = 6$ с, $n_{y_m} = 3$, $k_{w_1}^2 = 0,2$, $k_{w_2}^2 = 0,3$, $t_f = 8$ с, шаг интегрирования 0,01 с.

На рис. 2 представлены траектория движения автоматического ПА и графики зависимости угла θ и сигнала управления n_y от времени t , полученные с использованием предлагаемого численного метода решения.

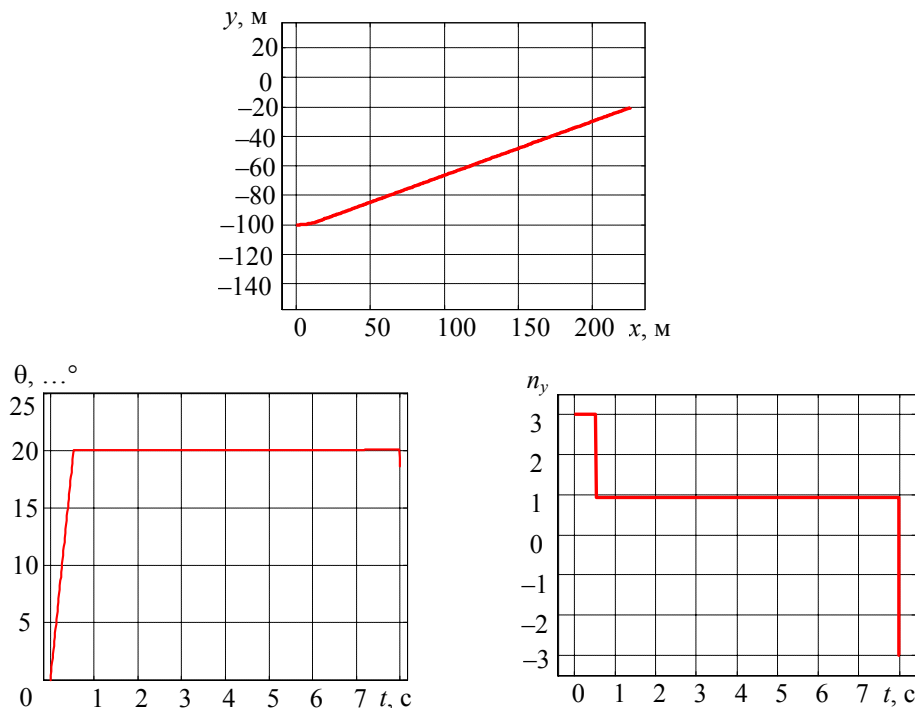


Рис. 2

На рис. 3 представлены графики зависимости управления моментами переключений τ_1 и τ_2 от времени, наглядно демонстрирующие, что момент τ_1 сходится к оптимальному значению, а τ_2 стремится к t_f , траектория как бы растягивается в прямую линию в целях достижения максимальной дальности.

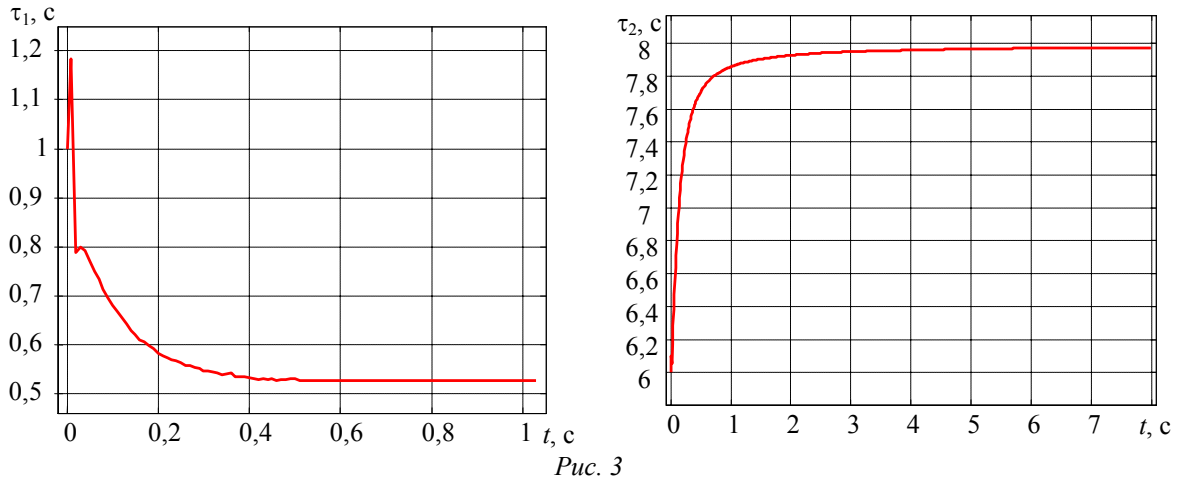


Рис. 3

Как видно из представленных графиков, фактически имеется только одно переключение τ_1 , что подтверждается физической сутью задачи.

График области достижимости при изменении угла ξ от -70° до 20° при начальных условиях, обозначенных выше, приведен на рис. 4.

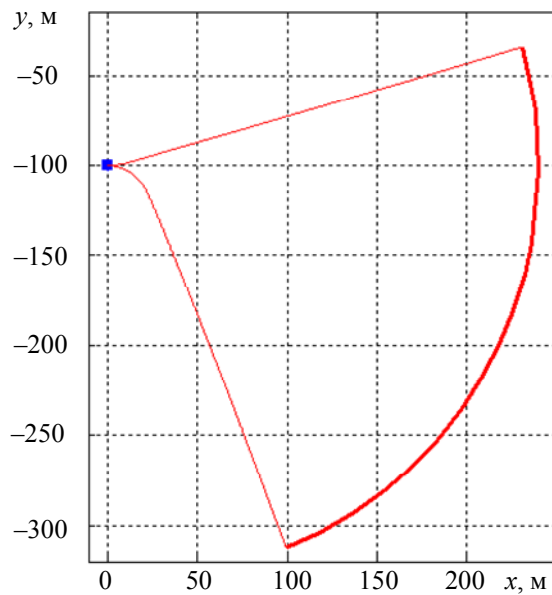


Рис. 4

Полученное решение можно использовать в качестве начального приближения для управления по методу Крылова — Черноушко, что сокращает число итераций при поиске оптимального управления. В рассматриваемых диапазонах изменения угла ξ использование такого начального приближения позволяет найти оптимальную программу для n_y за 1—2 итерации. Выбор начального приближения при $\tau_2 = t_f$ и неоптимальном значении τ_1 , отличающемся от оптимального на 1 с, приводит к решению за 8 итераций. В отличие от этого разработанный алгоритм коррекции структуры управления обеспечивает решение при произвольном выборе значений параметров τ_1 и τ_2 из интервала оптимизации.

Проведенные исследования показали устойчивую работу предложенного алгоритма при изменении условий задачи и начальных значений параметров системы управления. Алгоритм может быть применен и для построения вогнутой части границы области достижимости, а также для построения ее границ в пространстве при изменении скорости автоматического подводного аппарата, когда „особые“ управления определяются по более сложным зависимостям [4]. При этом объем вычислений изменяется незначительно, что позволяет осуществлять построение границы ОД в процессе движения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Черноусько Ф. Л. Оценивание фазового состояния динамических систем. Метод эллипсоидов. М.: Наука, 1988. 319 с.
2. Красовский Н. Н. Игровые задачи о встрече движений. М.: Наука, 1970. 420 с.
3. Толтегин О. А. Области достижимости летательных аппаратов. СПб: БГТУ, 2002. 106 с.
4. Малышев В. В., Кабанов Д. С. Оптимизация траектории движения материальной точки в пространстве с использованием алгоритма с заданной программой прогноза движения при ограничениях на управление // Тез. докл. 15-й Междунар. конф. „Системный анализ, управление и навигация“. М.: Изд-во МАИ-ПРИНТ, 2009. С. 61—62.
5. Справочник по теории автоматического управления / Под ред. А. А. Красовского. М.: Наука, 1987. 712 с.
6. Малышев В. В. Методы оптимизации в задачах системного анализа и управления: Учеб. пособие. М.: Изд-во МАИ-ПРИНТ, 2010. 440 с.
7. Лебедев А. А., Чернобровкин Л. С. Динамика полета беспилотных летательных аппаратов. Учеб. пособие. М.: Машиностроение, 1973. 616 с.
8. Буков В. Н. Адаптивные прогнозирующие системы управления полетом. М.: Наука, 1987. 232 с.
9. Кабанов С. А. Управление системами на прогнозирующих моделях. СПб: Изд-во СПбГУ, 1997. 200 с.
10. Горбатенко С. А., Макашов Э. М., Полушкин Ю. Ф., Шефтель Л. В. Расчет и анализ движения летательных аппаратов: Инж. справочник. М.: Машиностроение, 1971. 352 с.
11. Федоренко Р. П. Приближенное решение задач оптимального управления. М.: Наука, 1978. 488 с.
12. Кабанов Д. С. Оптимальное управление ядерным реактором с учетом случайных возмущений // Изв. вузов. Приборостроение. 2009. Т. 52, № 5. С. 27—30.

Сведения об авторах

- Вениамин Васильевич Малышев** — д-р техн. наук, профессор; Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет), кафедра системного анализа и управления; E-mail: veniaminmalyshev@mail.ru
- Дмитрий Сергеевич Кабанов** — аспирант; Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет), кафедра системного анализа и управления; E-mail: kabanovds@mail.ru

Рекомендована кафедрой
системного анализа и управления

Поступила в редакцию
16.01.12 г.

ЭЛЕКТРОННЫЕ И ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ УСТРОЙСТВА

УДК 681.586

В. В. ИВАНОВ, В. К. ШАКУРСКИЙ, М. В. ШАКУРСКИЙ

СИНТЕЗ ЦИФРОВЫХ ФИЛЬТРОВ ДЛЯ ГЕНЕРАТОРНЫХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ ПОВЫШЕННОЙ ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТИ

Рассматривается задача синтеза цифровых автоколебательных систем. Представлено решение задачи синтеза цифрового фильтра со смещаемой фазочастотной характеристикой.

Ключевые слова: цифровая автоколебательная система, баланс фаз, цифровой фильтр, амплитудно-частотная характеристика, фазочастотная характеристика.

Цифровые генераторные преобразователи состоят из аппаратного модуля, в котором происходит преобразование контролируемого физического параметра в управляющее воздействие, и программного модуля, представляющего собой виртуальную управляемую автоколебательную систему, преобразующую управляющее воздействие в изменение частоты генерируемого периодического сигнала [1, 2].

Основой автоколебательной системы являются цифровые фильтры (ЦФ) и обратные связи, необходимые для выполнения условий баланса амплитуд и баланса фаз. Частотный диапазон, способы управления и способы настройки генераторных преобразователей определяют свойства ЦФ.

Наиболее эффективный способ управления частотой генерируемого сигнала — внесение дополнительного фазового сдвига в автоколебательную систему, который изменяет условие баланса фаз. Следовательно, ЦФ должны иметь управляемую фазочастотную характеристику (ФЧХ). При этом амплитудно-частотная характеристика (АЧХ) должна сохранять заданную полосу пропускания, в которой выполняется условие баланса амплитуд.

При настройке генераторного преобразователя в режиме повышенной чувствительности необходимо и смещать ФЧХ, и изменять ее крутизну.

Разрешающую способность цифровых генераторных преобразователей определяет количество отсчетов в „скользящей“ выборке сигнала. Например, при точности преобразования порядка долей процента, количество отсчетов должно составлять единицы и десятки тысяч. Обработка такого количества отсчетов требует увеличения интервала дискретизации, а это ограничивает частотный диапазон использования генераторных преобразователей. Необходимы быстрые алгоритмы цифровой фильтрации.

Как показывают исследования алгоритмов цифровой фильтрации, вышеперечисленным условиям удовлетворяют цифровые фильтры, которые синтезируются методом частотной выборки.

В основе метода частотной выборки лежит аппроксимация АЧХ фильтра рядом Котельникова, поэтому для реализации заданной АЧХ нужны элементарные цифровые фильтры (ЭЦФ), соответствующие элементам ряда: т.е. АЧХ элементарных ЦФ должны описываться функцией sinc, а ФЧХ должны быть линейной функцией.

Одним из способов синтеза ЭЦФ является использование „скользящего“ комплексного дискретного преобразования Фурье [3, 4]. В этом случае средняя частота каждого ЭЦФ равна соответствующей составляющей спектра „скользящей“ выборки сигнала, начиная с нулевой. Комплексные отсчеты спектра „скользящей“ выборки сигнала определяются выражением

$$X_{q,n} = \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} u_n e^{\frac{-2j\pi nq}{N}}, \quad (1)$$

где u — массив отсчетов входного сигнала; q — номер спектральной составляющей и соответственно номер ЭЦФ, N — количество отсчетов в выборке сигнала.

При смещении выборки на один отсчет исключается первое слагаемое с нулевой фазой в сумме (1) и добавляется одно новое. Все остальные слагаемые остаются неизменными, изменяются лишь их порядковые номера на единицу, что эквивалентно повороту суммарного вектора на угол $2\pi nq/N$. Таким образом, значение очередного вектора можно определить на основе значения предыдущего вектора. Умножение вектора на единичный вектор поворота с заданным углом ψ позволяет внести в ЭЦФ необходимое смещение по фазе, что приводит к смещению его ФЧХ. В результате математическая модель работы ЭЦФ принимает следующий вид:

$$U_{q,n} = 2 \left(\left(X_{q,n-1} e^{\frac{2j\pi q}{N}} - \frac{u_{n-N-1}}{N} e^{\frac{2j\pi q}{N}} + \frac{u_n}{N} e^{\frac{2j\pi q}{N}} \right) e^{j\psi q} \right). \quad (2)$$

Комплексное значение выходного сигнала ЦФ определяется суперпозицией комплексных значений сигналов ЭЦФ:

$$U_n = \sum_q \left(K_q (-1)^q U_{q,n} \right), \quad (3)$$

где K_q — амплитудный коэффициент выходного сигнала соответствующего ЭЦФ; множитель $(-1)^q$ необходим для согласования ФЧХ отдельных ЭЦФ.

Отсчеты выходного сигнала ЦФ определяются либо как действительная, либо как мнимая составляющие вектора (3):

$$u_{\text{вых},n} = \text{Re}(U_n), \quad u'_{\text{вых},n} = \text{Im}(U_n). \quad (4)$$

Это позволяет дополнительно смещать ФЧХ на угол $\pi/2$.

Для нулевого ЭЦФ выражение (1) преобразуется к виду

$$X_{0,n} = \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} u_n. \quad (5)$$

Математическая модель работы нулевого ЭЦФ имеет следующий вид:

$$U_{0,n} = X_{0,n-1} - \frac{u_{n-N-1}}{N} + \frac{u_n}{N}. \quad (6)$$

Частотная характеристика ЭЦФ при использовании действительной составляющей комплексного выходного сигнала описывается выражением

$$S_q(\tilde{\omega}) = \left(\frac{-\tilde{\omega} \sin(-2\pi\tilde{\omega})}{\pi(\tilde{\omega}^2 - q^2)} - j \frac{\tilde{\omega} - \tilde{\omega} \cos(-2\pi\tilde{\omega})}{\pi(\tilde{\omega}^2 - q^2)} \right) e^{j\psi q}, \quad (7)$$

модуль которого является АЧХ, а аргумент — ФЧХ, $\bar{\omega}$ — нормированная частота.

На рис. 1 приведены АЧХ и ФЧХ четвертого ЭЦФ ($q = 4, \psi = 0$). Изменение угла наклона ФЧХ при неизменном интервале дискретизации достигается изменением количества отсчетов в „скользящем“ окне. Период единичной нормированной частоты равен времени получения этих отсчетов. Следовательно, при изменении угла наклона ФЧХ смещаются средние реальные частоты фильтров. Это усложняет настройку генераторных преобразователей. Для компенсации смещения средних частот необходимо смещать ФЧХ.

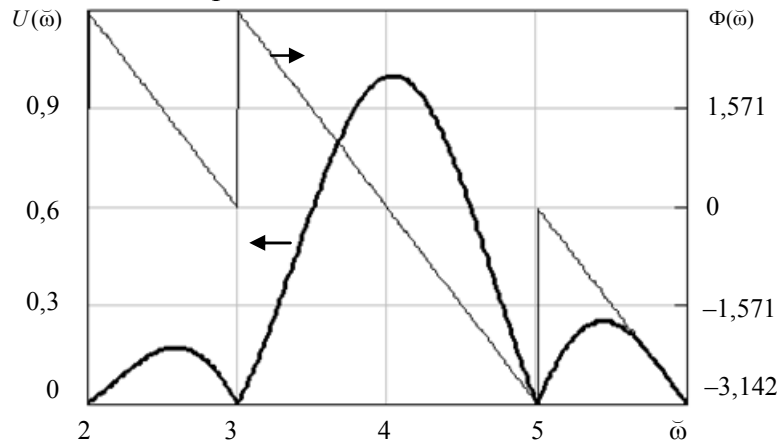


Рис. 1

В генераторных преобразователях необходимо синтезировать ЦФ с большим подавлением сигнала вне полосы пропускания, чем у ЭЦФ, и с расширенной полосой пропускания, чтобы максимально использовать участок $\pm\pi$ ФЧХ. Это достигается дополнительным введением двух соседних ЭЦФ с определенными амплитудными коэффициентами. Например, добавив к четвертому ЭЦФ с единичным амплитудным коэффициентом третий и пятый с амплитудными коэффициентами 0,41 и 0,44, получим частотные характеристики, приведенные на рис. 2 ($\psi = -0,2$ для всех ЭЦФ). Таким образом, подавление сигнала вне полосы пропускания увеличилось, ФЧХ сместилась на заданный угол и полоса пропускания стала шире, что позволяет максимально использовать область $\pm\pi$ ФЧХ при соответствующем выборе коэффициентов усиления в цепи обратной связи автоколебательной системы. Очевидно, что ЦФ, состоящий из трех ЭЦФ, является оптимальным.

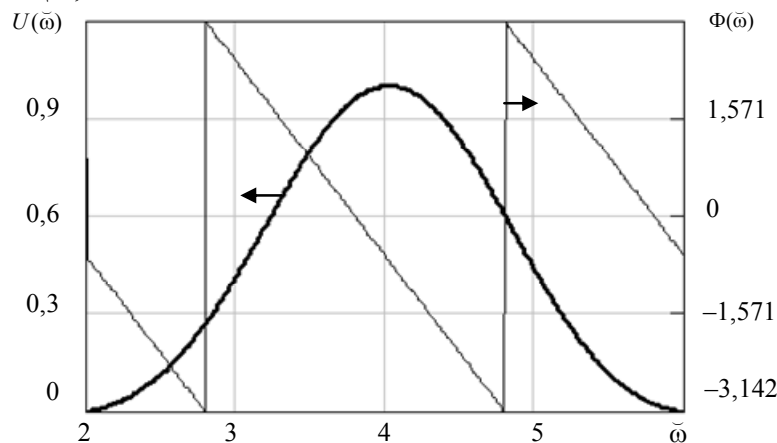


Рис. 2

В генераторных преобразователях повышенной чувствительности, при реализации фильтра с инвертированной ФЧХ, используется блок выделения постоянной составляющей. Его функцию выполняет нулевой ЭЦФ, частотные характеристики которого совпадают с приведенными на рис. 2.

Таким образом, использование метода частотной выборки и прямого „скользящего“ комплексного дискретного преобразования Фурье позволяет синтезировать цифровой фильтр, обладающий необходимым быстродействием и широкими возможностями для независимого смещения фазочастотных характеристик, что необходимо при настройке генераторных преобразователей.

Приведенные результаты получены в рамках НИР, выполняемой по плану фундаментальных исследований Поволжского государственного университета сервиса, поддерживаемых госбюджетным финансированием.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Шакурский В. К., Иванов В. В. Увеличение чувствительности генераторных параметрических преобразователей // Изв. вузов. Приборостроение. 2005. Т. 48, № 7. С. 47—51.
2. Шакурский В. К., Нагаев Д. А. Цифровой генераторный преобразователь повышенной чувствительности // Изв. вузов. Приборостроение. 2010. Т. 53, № 1. С. 45—49.
3. Шакурский В. К., Шакурский М. В. Математическая модель цифровых фильтров, реализуемых методом частотной выборки // Вектор науки Тольяттинского государственного университета. 2011. № 2(16). С. 94—96.
4. Заявка № 2011122036/08. Цифровой фильтр со смещаемой фазочастотной характеристикой / В. К. Шакурский, М. В. Шакурский. Решение о выдаче патента РФ на полезную модель от 24.06.2011.

Сведения об авторах

Виктор Васильевич Иванов

— д-р техн. наук, доцент; Поволжский государственный университет сервиса, кафедра информационного и электронного сервиса, Тольятти; E-mail: Ivanov@tolgas.ru

Виктор Константинович Шакурский

— д-р техн. наук, профессор; Тольяттинский государственный университет, кафедра электроснабжения и электротехники; E-mail: Shakurskiy@mail.ru

Максим Викторович Шакурский

— Поволжский государственный университет сервиса, кафедра информационного и электронного сервиса, Тольятти; зав. лабораторией; E-mail: M.Shakurskiy@gmail.com

Рекомендована кафедрой
информационного и электронного
сервиса ПВГУС

Поступила в редакцию
29.12.11 г.

В. Л. ТКАЛИЧ, Р. Я. ЛАБКОВСКАЯ, О. И. ПИРОЖНИКОВА

АНАЛИЗ ПРИСОЕДИНЕННЫХ МАСС УПРУГИХ ЧУВСТВИТЕЛЬНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ РТУТНЫХ ГЕРКОНОВ

Представлен анализ конструктивных особенностей ртутных герконов и определены факторы, влияющие на значения присоединенных масс упругих чувствительных элементов. Предложена модель определения присоединенной массы таких элементов и получено аналитическое выражение для их амплитудно-частотных характеристик.

Ключевые слова: герконы, присоединенная масса, упругие чувствительные элементы.

Разработка жидкостных герконов требует глубокого исследования зависимости их частотных характеристик от свойств демпфирующей жидкости. В настоящей статье представлен анализ рассмотренных в работе [1] математических моделей динамики упругого чувствительного элемента (УЧЭ, далее — ЧЭ) ртутного геркона и приводится полученное аналитическое выражение для амплитудно-частотных характеристик (АЧЧ) данного типа элементов.

Примеры ртутных герконов приведены на рис. 1.

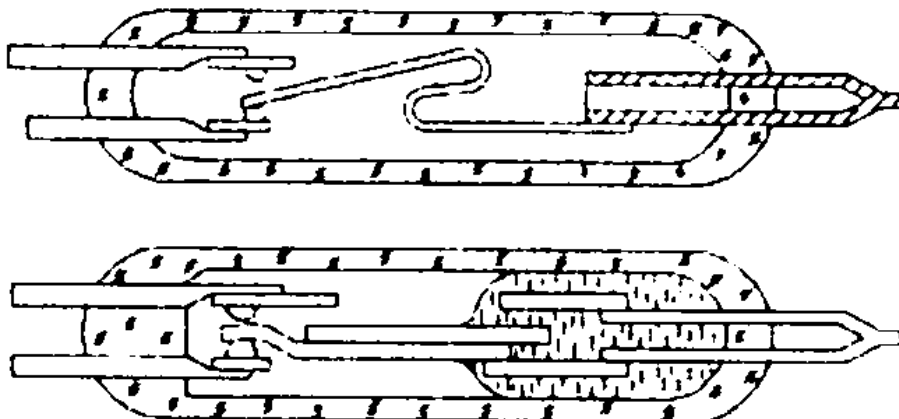


Рис. 1

В работе [2] в качестве модели динамики ЧЭ используется нелинейное дифференциальное уравнение второго порядка:

$$\ddot{y} + 2n\dot{y} + \mu\dot{y}|\dot{y}| + \omega_0^2 y = a_0 \sin \omega t, \quad (1)$$

где y — смещение ЧЭ геркона от положения равновесия; \dot{y} , \ddot{y} — скорость и ускорение смещения ЧЭ геркона соответственно; ω_0 — собственная частота колебаний геркона; n — коэффициент линейного трения; a_0 — измеряемое ускорение; μ — коэффициент нелинейного трения.

Для получения математической (уточненной) модели динамики ЧЭ ртутного геркона и выражения для его АЧЧ следует учитывать присоединенную массу ртути, поэтому вместо единичной массы m_0 ЧЭ будем использовать суммарную массу m_{Σ} чувствительных элементов, состоящих из нескольких звеньев.

Установлено [3], что факторами, влияющими на значения присоединенных масс ЧЭ, являются:

- плотность ртути;
- геометрические размеры ЧЭ и герметизирующего баллона;

- конструктивные особенности баллона;
- способ крепления ЧЭ в баллоне;
- близости стенок баллона к ЧЭ.

Запишем выражение для присоединенной массы Δm : с условием обтекаемости элемента струей ртути

$$\Delta m = 0,4224\rho d^2 l \left(1 + \frac{dq}{2l}\right)^{-1} k_{\text{п}} K, \quad (2)$$

где ρ — плотность ртути; d и l — ширина и длина ЧЭ; q — размер ЧЭ (для обобщенного случая); $k_{\text{п}}$ — коэффициент, определяющий влияние наличия свободной поверхности ртути на величину Δm , K — коэффициент, характеризующий форму ЧЭ и герметизирующего баллона, а также их взаимное положение относительно друг друга [4].

На рис. 2—5 представлены графики подбора коэффициента K в зависимости от геометрии геркона:

- баллон и ЧЭ имеют прямоугольное сечение (рис. 2);
- баллон имеет круглое сечение, ЧЭ — прямоугольное (рис. 3);
- баллон и ЧЭ имеют сечение (рис. 4);
- баллон и ЧЭ имеют круглое сечение при ЧЭ, смещенном относительно оси баллона (рис. 5).

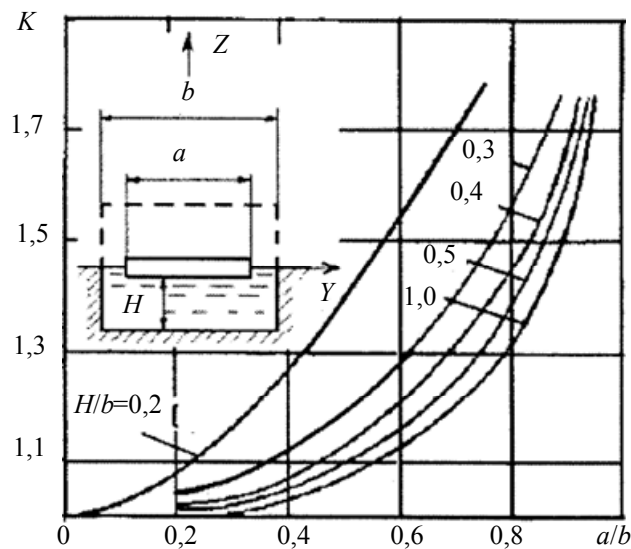


Рис. 2

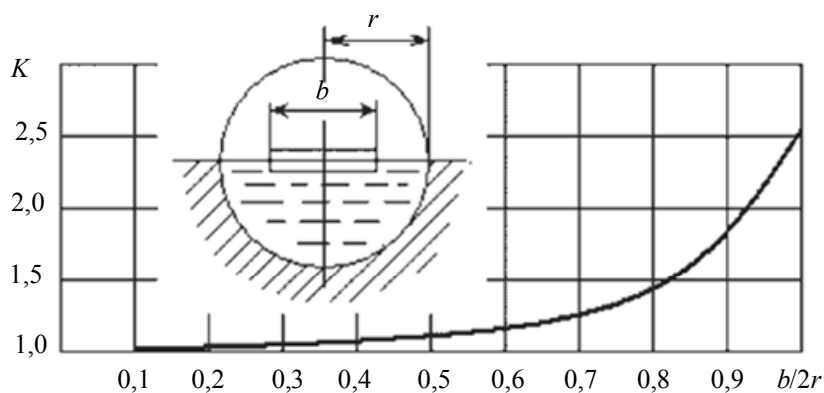


Рис. 3

Разработанная математическая модель (2) для определения присоединенных масс ртути упругих чувствительных элементов герконов позволит осуществлять надежное прогнозирование их частотных характеристик.

Используя полученную модель определения присоединенной массы Δm , с учетом того, что возмущающая сила, приводящая к колебанию ЧЭ, изменяется по закону $F(t) = F_0 \cos \omega t$, подставим выражение (2) в уравнение, описывающее динамику плоских ЧЭ газонаполненных и жидкостных герконов [3]. В результате получим математическую модель динамики ЧЭ геркона:

$$\ddot{y} + 2 \frac{n}{m_{\Sigma}} \dot{y} + \frac{\mu}{m_{\Sigma}} \dot{y} |\dot{y}| + p_k^2 y = (F_0/m_{\Sigma}) \cos \omega t, \quad (3)$$

где $m_{\Sigma} = m_0 l + \Delta m$, ω — частота внешнего воздействия.

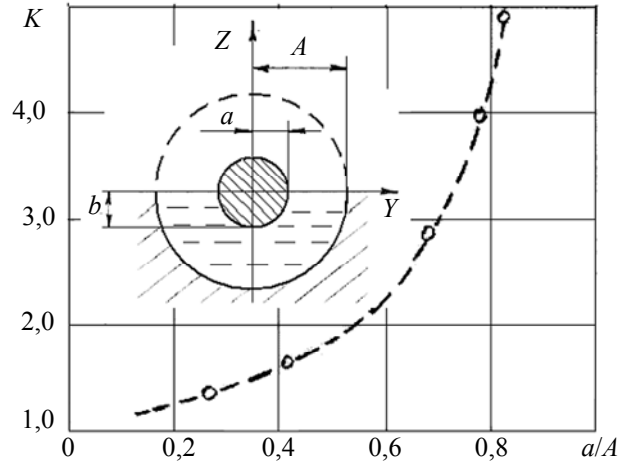


Рис. 4

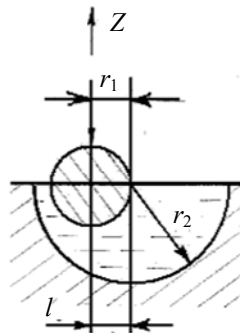
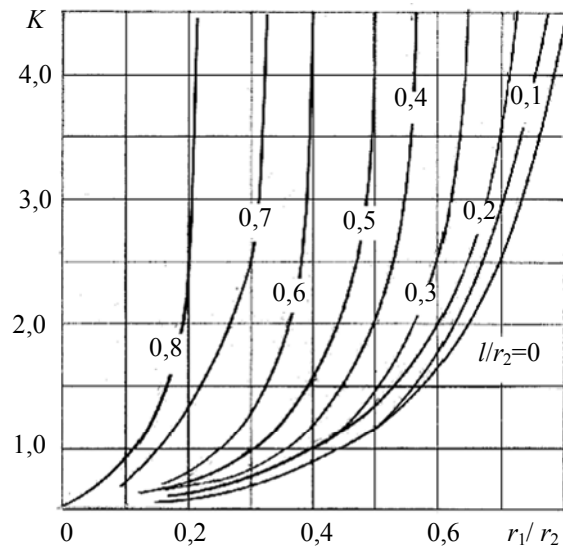


Рис. 5

С использованием метода комплексных амплитуд [5] получено аналитическое выражение для АЧХ упругих чувствительных элементов геркона:

$$A(\omega) = \frac{F_0}{m_{\Sigma} \sqrt{\left(p_k^2 - \omega^2 \right)^2 + \left(2 \frac{n}{m_{\Sigma}} \omega + \frac{\mu}{m_{\Sigma}} A(\omega) \omega^2 \right)^2}}. \quad (4)$$

В уравнениях (3) и (4) $p_k = \lambda_k^2 \sqrt{\frac{EJ}{m_{\Sigma} l^3}}$ — собственная частота колебаний ЧЭ, здесь

$$\lambda_k = \frac{2k-1}{2} \pi, \quad k = 1, 2, 3, \dots; \quad E — \text{модуль упругости}; \quad J — \text{момент инерции}.$$

Таким образом, выведена модель определения присоединенных масс ЧЭ с учетом следующих факторов: плотности среды (ртути), наличия свободной поверхности среды, положения ЧЭ в пространстве и конкретной геометрии ЧЭ.

Полученное выражение (4) позволяет выявить влияние присоединенных масс упругих чувствительных элементов на их АЧХ.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Лабковская Р. Я., Нечаев В. А., Нечаева Н. В., Пирожникова О. И. Математические модели чувствительных элементов линейного акселерометра в динамическом режиме // Сб. тез. докл. VIII Всерос. межвуз. конф. молодых ученых. Вып. 1. СПб: СПбГУ ИТМО, 2011. С. 138—139.
2. Курзнер А. Б., Ибрагимов И. Х. Экспериментальное определение параметра модели акселерометра с нелинейным жидкостным демпфированием // Метрология. 1975. № 1. С. 37—42.
3. Ткалич В. Л. Надежность магнитоуправляемых контактов в системах управления. Монография. СПб: СПбГИТМО, 2000. С. 100.
4. Ткалич В. Л. Упругие чувствительные элементы систем управления (Принципы построения, анализ и математическое моделирование): Автореф. дис. ... д-ра техн. наук. СПб: СПбГИТМО, 2001. С. 34.
5. Кокиаров Д. Н., Ткалич В. Л., Буданова А. Ю., Коробейникова М. А. Нелинейные дифференциальные уравнения движения упругих чувствительных элементов // Тр. конф. „Интеллектуальные системы“, „Интеллектуальные САПР“. М.: Физматлит, 2006. Т. 2. С. 145—153.

Сведения об авторах

- Вера Леонидовна Ткалич** — д-р техн. наук, профессор; Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, кафедра проектирования и безопасности компьютерных систем; E-mail: Vera_Leonidovna_Tkalich@mail.ru
- Римма Яновна Лабковская** — аспирант; Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, кафедра проектирования и безопасности компьютерных систем; E-mail: studsovet_itmo@mail.ru
- Ольга Игоревна Пирожникова** — аспирант; Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, кафедра проектирования и безопасности компьютерных систем; E-mail: studsovet_itmo@mail.ru

Рекомендована кафедрой
проектирования и безопасности
компьютерных систем

Поступила в редакцию
15.11.11 г.

ОПТИЧЕСКИЕ И ОПТИКО-ЭЛЕКТРОННЫЕ ПРИБОРЫ И СИСТЕМЫ

УДК 535.317.2 681.7.012.2

А. В. ПРАВДИВЦЕВ

ОБЪЕКТИВ ДЛЯ ХРОМАТИЧЕСКОЙ СЕЛЕКЦИИ СПЕКТРАЛЬНЫХ КОМПОНЕНТОВ ИЗОБРАЖЕНИЯ ПОЛИХРОМАТИЧЕСКОГО КОЛЬЦЕВОГО ПРЕДМЕТА

Представлен расчет объектива, предназначенного для хроматической селекции спектральных компонентов изображения полихроматического кольцевого предмета, цвет которого на экране определяется величиной переднего отрезка оптической системы. Приведены рекомендации по проектированию систем такого рода.

Ключевые слова: проекционные объективы, оптимизация, хроматические aberrации.

В рамках международного семинара по оптическому проектированию “IODS’10” (International Optical Design Seminar — 2010) [1] был организован конкурс среди молодых специалистов, ученых, аспирантов и студентов. Третье место на конкурсе было присуждено автору настоящей статьи, в которой и представлено решение предложенной задачи.

Автор задачи В. Ульрих, директор Центра оптического проектирования компании “Carl Zeiss AG”, сформулировал ее следующим образом: необходимо рассчитать объектив, предназначенный для проецирования изображений разноцветных олимпийских колец на экран с большой четкостью. Предмет — бесконечно тонкое полихроматическое светящееся кольцо диаметром 10 мм; числовая апертура в пространстве предметов 0,2; увеличение, рассчитанное в параксиальной области от предмета до экрана, — $100\times$; длины волн λ : 480 нм (синяя), 546 нм (зеленая), 587 нм (желтая), 643 нм (красная). Оптическая система должна выделять кольцо определенного цвета путем перефокусировки. Поверхности линз должны быть поверхностями вращения, допустимо применение асферических поверхностей; количество линз не более 5. При проектировании необходимо использовать материалы только из каталогов оптического стекла фирм “Schott” и “Ohara” [2, 3]. Система не должна иметь виньетирования. Лучшим считается объектив, формирующий самое резкое изображение олимпийских колец одного размера на экране. Эффектами дифракции следует пренебречь.

Из анализа поставленной задачи следует, что она сформулирована неполно: например, не указаны величины переднего и заднего отрезков объектива, допустимое размытие колец и отклонение диаметра изображения колец от номинального значения. В этой связи для решения задачи были приняты следующие допущения: цель оптимизации — получить изображение всех колец требуемого цвета с диаметром 1 м и наименьшей толщиной, допускается наличие слабоконтрастного цветного ореола; плоскость изображения располагается на расстоянии 1 м от последней линзы. Из этого следует, что система должна обладать неисправленным

хроматизмом положения. В этом случае в плоскости наилучшей установки предмета для каждой длины волны будет сформировано резкое изображение кольца требуемого цвета.

Предварительно, до начала решения задачи, следует задать два критерия, по которым будет оцениваться результат:

1) средневзвешенный критерий

$$R = r_0 \sum_i r_i^{-1} / 3, \quad (1)$$

где r_0 — среднеквадратичный радиус пятна (СРП) рассеяния для основной в данной конфигурации объектива длины волны, r_i — радиусы пятен рассеяния для других длин волн;

2) критерий Чебышева

$$R_C = r_0 / \min r_i. \quad (2)$$

Далее будем использовать интегральные критерии, представляющие собой средние значения соответствующих критериев для всех длин волн.

Первый этап решения. Один из вариантов решения данной задачи — система с телецентрическим ходом лучей в пространстве изображений; в этом случае яркое кольцо будет располагаться на фоне цветного ореола. Серьезным недостатком этой схемы является сопоставимость габаритов линз с размером изображения. Так как по техническому заданию размер изображения составляет 1 м, от данного варианта следует отказаться.

Опишем поэтапно процесс создания системы. В качестве прототипа для первоначальной оптимизации был выбран проекционный объектив, разработанный автором ранее (рис. 1).

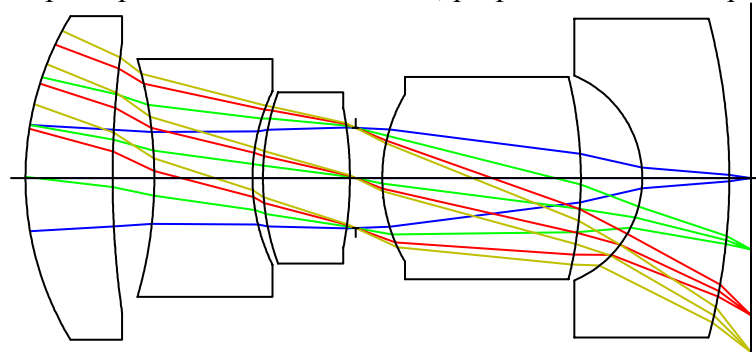


Рис. 1

Объектив, в контексте задачи, имеет следующие недостатки: относительное отверстие не соответствует заданному; не выполняются особые требования по формированию колец, размерам предмета и изображения. Несмотря на это, объектив удовлетворяет требованиям по количеству линз и качеству оптического изображения.

Оптимизация была осуществлена следующим образом.

1. Выполнен переход к расчету исходной схемы в прямом ходе лучей. Так как предметом является кольцо, трассировка лучей производится только для единственной полевой точки. Введение дополнительных полевых точек усложнит реализацию оптимизационного алгоритма по нахождению минимума функции качества.

2. На первом этапе рассматривалась система, в которой величина переднего отрезка задается разработчиком как конструктивное ограничение. Для каждой длины волны была создана конфигурация с величиной переднего отрезка от 1,6 до 1,9 мм с шагом 0,1 мм.

3. Для выполнения требования по формированию изображений колец одного размера в оптимизационную функцию вводился операнд, контролирующий высоту главного луча на поверхности изображения для соответствующей длины волны в каждой конфигурации. Получение резкого изображения колец выполняется заданием операндов, минимизирующих СРП для требуемой длины волны. СРП для остальных (паразитных) длин волн в данной конфигурации не контролировался.

4. Проведен ряд сеансов локальной оптимизации системы с межсеансным изменением набора варьируемых параметров, перестройкой функции качества и принудительным изменением конструктивных параметров: в частности, был убран воздушный промежуток между двумя последними линзами для лучшей коррекции аберраций.

5. В целях увеличения размытия цветного ореола передний отрезок был увеличен до 1,5, 2, 2,5 и 3 мм для длин волн 480, 546, 587 и 643 нм соответственно.

В результате оптимизации была получена схема, представленная на рис. 2, а.

Для оценки точности выделения колец определим, как меняется качество изображения в зависимости от величины переднего отрезка. Для этого найдем максимальный размер квадрата, в который собирается 95 % энергии для основной в данной конфигурации длины волны. Во всех конфигурациях это выполняется для квадрата со стороной 3 мм. Диаграмма зависимости концентрации энергии (E) в квадрате указанного размера для каждой длины волны от величины переднего отрезка (s) показана на рис. 2, б; центр квадрата располагается в центре масс пятна рассеяния.

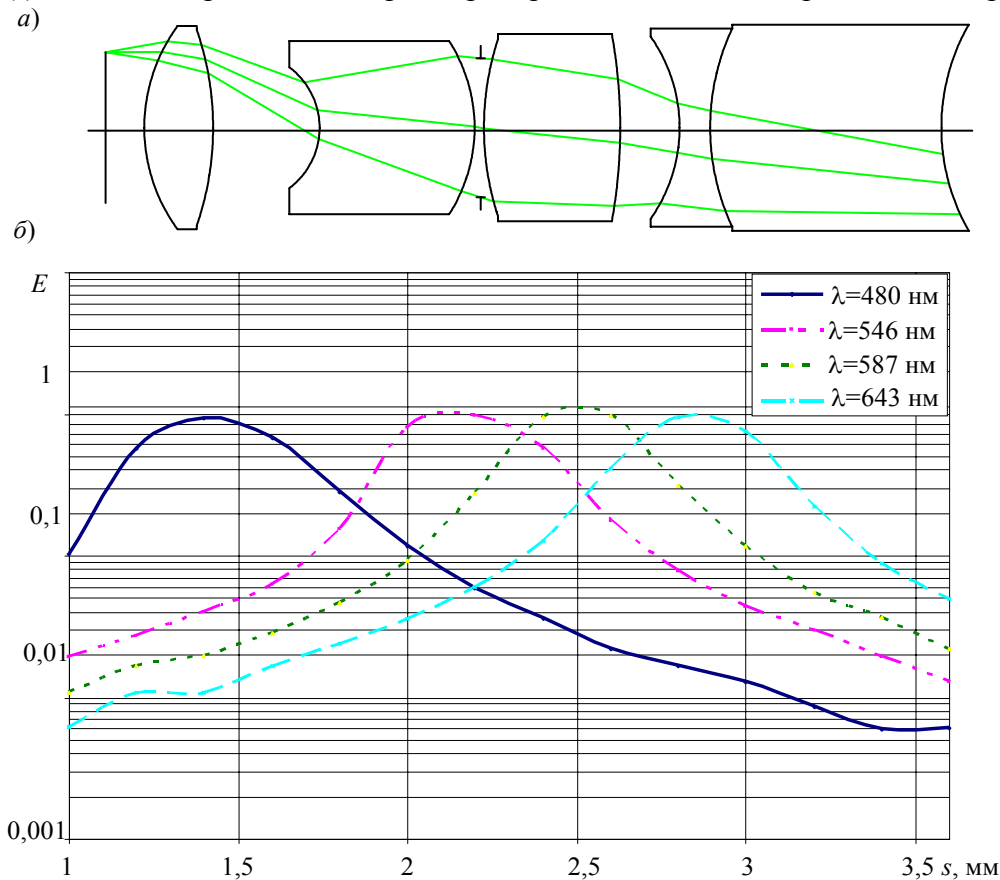


Рис. 2

Как видно из рисунка, система при указанных выше величинах переднего отрезка выделяет кольца требуемого цвета. Концентрация энергии для основной длины волны в точке фокусировки как минимум в 2 раза больше, чем для паразитных длин волн. Оказалось, что максимум концентрации для всех длин волн, кроме третьей, смещен относительно номинального положения. Это означает, что в процессе оптимизации для них не удалось совместить плоскость наилучшей установки предмета с заданной величиной переднего отрезка.

Полученная система удовлетворяет требованиям, указанным в задании. Изображение кольца имеет расфокусированный цветной ореол, минимальное отличие величин переднего отрезка в различных положениях составляет 0,4 мм. Однако данный вариант объектива имеет и недостатки: толстые линзы, форма последней поверхности является неудобной для нанесения просветляющих покрытий, диаметр колец по главному лучу отличается от номинального менее чем на 0,6 мм.

Так как в техническом задании не указаны численные значения допусков на нерезкость изображения колец и отклонения их диаметров от номинального значения, для исправления указанных недостатков продолжим оптимизацию. Для корректного сравнения данного варианта объектива с последующими рассчитаем интегральные коэффициенты: значение средневзвешенного критерия согласно формуле (1) равно 0,7009, критерия Чебышева (см. формулу (2)) — 0,3211.

Второй этап решения. На втором этапе оптимизации в целях обеспечения дополнительной степени свободы оптимизационного алгоритма вариант с жестким заданием величины переднего отрезка для различных длин волн был отклонен. Для увеличения хроматической разницы все материалы были заменены стеклом с самым низким показателем Аббе в каталогах “Ohara” и “Schott” (по данным каталогов программы Zemax [4]): это стекло S-NPH2 из каталога “Ohara”, показатель Аббе для которого составляет 18,89. В целях увеличения разницы между величинами переднего отрезка в различных конфигурациях в системе не использовалась склейка группы линз [5]. Кроме того, был увеличен вес операнда, контролирующего высоту главного луча на поверхности изображения, для более точного соблюдения размера колец в каждой конфигурации. Оптимизация, как и на первом этапе, проводилась по критерию наименьшего СРП для основной длины волны в данной конфигурации.

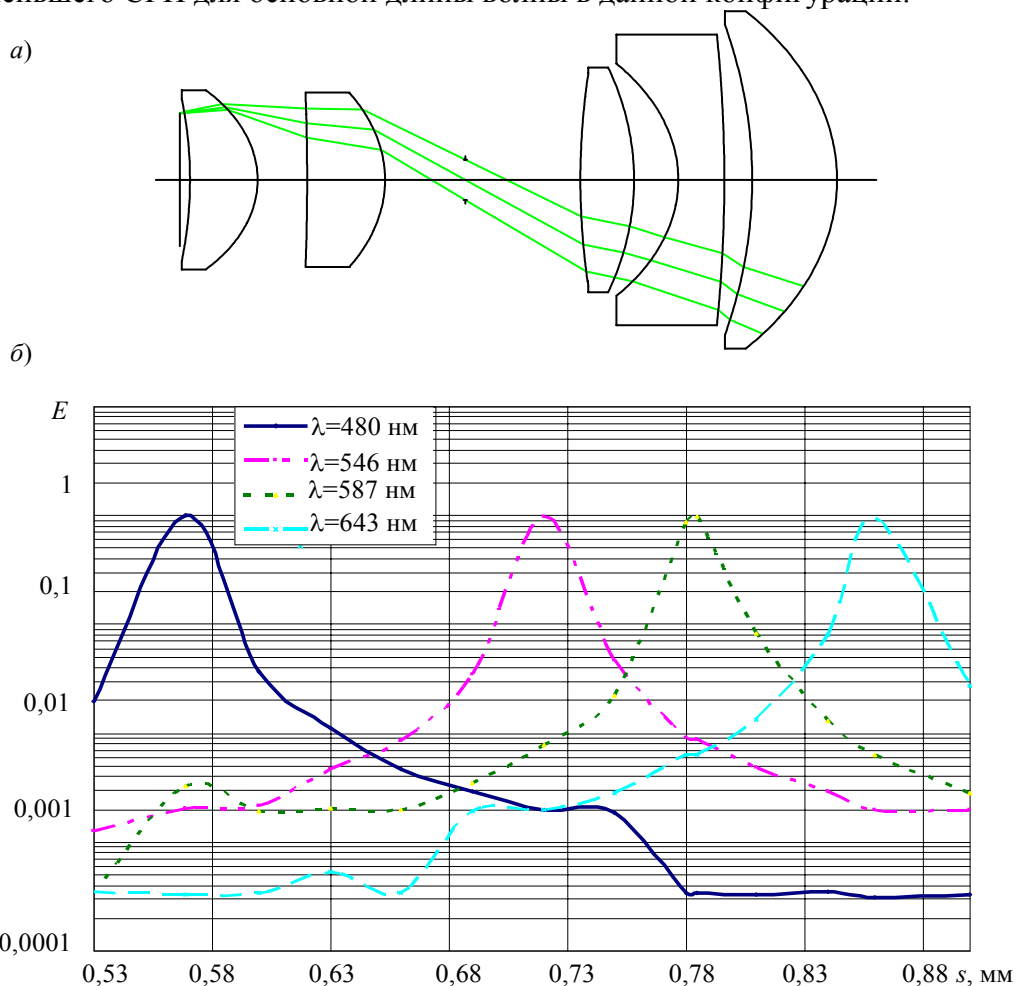


Рис. 3

В результате оптимизации получен 5-линзовый объектив (рис. 3, а), для которого интегральные критерии составляют 0,0791 и 0,0381, отклонение диаметра от номинального значения менее 4 мкм. Таким образом, по интегральным критериям удалось улучшить схему более чем в 8 раз. Отметим, что максимальный диаметр пятна рассеяния для основной длины волны в каждой конфигурации меньше диаметра кружка Эри. Критерий Штреля для основных длин волн составляет более 0,9, система обладает дифракционным качеством.

Оценим качество выделения колец аналогично тому, как это сделано для предыдущего варианта. В данной системе 95 % энергии для основной длины волны собирается в квадрате со стороной 0,266 мм (что в 11,2 раза лучше, чем данный показатель в предыдущей системе). На рис. 3, б показано значение концентрации энергии в зависимости от величины переднего отрезка: отчетливо видны 4 пика, соответствующие точкам фокусировки длин волн. Так как объект является полихроматическим, в изображении будут присутствовать все длины волн, поэтому важный вопрос при создании системы такого рода — поведение паразитных длин волн. Как видно из графика, концентрации энергии для паразитных в данной конфигурации длин волн более чем в 100 раз меньше концентрации энергии для основной длины волны, что гораздо лучше, чем в промежуточном варианте (см. рис. 2, б). Это говорит о том, что цветной ореол будет слабо заметен. Цветные кольца выделяются однозначно: в наихудшем случае (вторая и третья длины волн), разница между величиной переднего отрезка для двух соседних пиков по уровню 0,1 составляет 30 мкм.

Определим, как изменится качество системы при уменьшении количества линз. Обратим внимание на то, что последняя линза практически не меняет направления хода лучей, поэтому удалим ее. В результате оптимизации 4-линзового варианта объектива (рис. 4) с использованием исходной оптимизационной функции были получены следующие значения показателя качества: 0,0807 и 0,0393. Следует отметить, что в данном варианте разница между диаметрами изображений колец, определяемыми по главному лучу, составила менее 6 мкм. 4-линзовый объектив хуже 5-линзового по средневзвешенному критерию в 1,02 раз, по критерию Чебышева — в 1,031 раз, по отклонению диаметра изображений колец от номинального значения — в 1,2 раза.

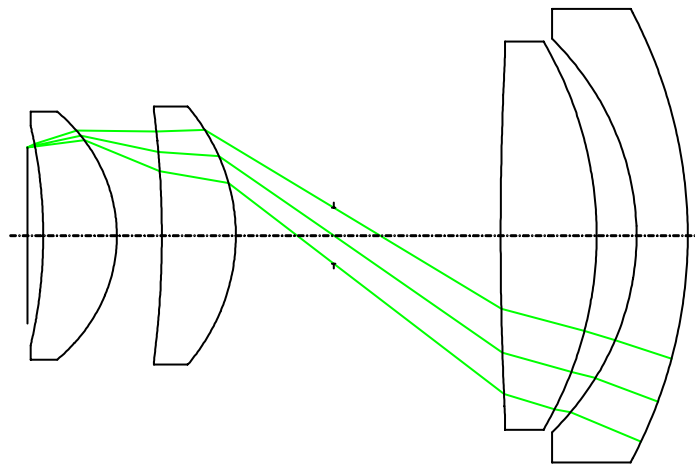


Рис. 4

Проверим, как повлияет введение асферических поверхностей на качество системы. При введении поверхностей 2...6-го порядков улучшения качества не наблюдается. При введении поверхностей более высокого порядка при тех же размерах пятен рассеяния отклонение диаметра от номинального значения составляет менее 1 мкм. Введение в 4-линзовую систему асферических поверхностей 10-го порядка позволяет достичь качества, соответствующего 5-линзовому объективу. Это не противоречит условию задачи, но может создать определенные трудности при производстве.

Учитывая качество формируемого изображения и технологичность изготовления, принято решение использовать 5-линзовый объектив без асферических поверхностей. Апертурная диафрагма диаметром 1,51 мм располагается на расстоянии 4,17 мм после 4-й поверхности. Величина переднего отрезка для длин волн 480, 546, 587 и 643 нм равна соответственно 0,569, 0,716, 0,785 и 0,86 мм. Задний отрезок в первой конфигурации равен 1000 мм, в остальных

меняется для сохранения постоянного расстояния между плоскостью предмета и изображения. Конструктивные параметры 5-линзового объектива приведены в таблице.

Номер поверхности	Радиус поверхности, мм	Расстояние между поверхностями по оси, мм	Световой диаметр, мм
1	-43,57		10,48
		3,51	
2	-9,76		11,74
		2,57	
3	-269,70		11,62
		4,05	
4	-12,48		11,64
		10,15	
5	78,26		14,14
		2,79	
6	-27,20		14,98
		2,3	
7	-13,45		15,52
		2,39	
8	-154,71		19,97
		1,45	
9	-48,64		21,45
		4,41	
10	-19,34		23,46

Следует отметить, что поскольку коэффициент корреляции зависимостей $s(\lambda)$ и $n(\lambda^{-1})$ составляет 0,9999 (что согласуется с теорией [6]), то определять положения плоскости наилучшей установки предмета для других длин волн можно теоретически, без повторной оптимизации системы. При проектировании систем с пространственным разделением изображения по длинам волн рекомендуется отказаться от жесткого задания дистанции фокусировки для получения более высокого качества изображения.

Автор выражает благодарность организаторам и участникам международного семинара по оптическому проектированию "IODS'10", а также А. Н. Юдину за ценные консультации в процессе создания системы.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Официальный web-сайт международного семинара "IODS'10" [Электронный ресурс]: < <http://iods.pro/> >.
2. Glass catalog: Официальный web-сайт "Ohara Corporation" [Электронный ресурс]: < <http://www.oharacorp.com/catalog.html> >.
3. Glass catalog: Официальный web-сайт "Schott Corporation" [Электронный ресурс]: < http://www.schott.com/advanced_optics/english/our_products/materials/optical_glass.html >.
4. Zemax. Optical Design Program. User's Guide. 2008. Nov. 10. 756 p.
5. Русинов М. М. Техническая оптика. Л.: Машиностроение, 1979. 448 с.
6. Заказнов Н. П., Кирюшин С. И., Кузичев В. Н. Теория оптических систем. М.: Машиностроение, 1992. 448 с.

Сведения об авторе

Андрей Виталиевич Правдивцев — Научно-исследовательская группа „Конструктивная кибернетика“, Москва; ведущий специалист; E-mail: apravd@gmail.com

Рекомендована кафедрой
оптико-электронных приборов научных исследований
МГТУ им. Н. Э. Баумана

Поступила в редакцию
07.06.11 г.

Р. М. АРХИПОВ, М. В. АРХИПОВ, В. С. ЕГОРОВ, И. А. ЧЕХОНИН,
М. А. ЧЕХОНИН, С. Н. БАГАЕВ

ЭФФЕКТИВНОЕ ВОЗБУЖДЕНИЕ ПОЛЯРИТОННЫХ МОД ОПТИЧЕСКОГО РЕЗОНАТОРА С РЕЗОНАНСНО-ПОГЛОЩАЮЩИМ ВЕЩЕСТВОМ БЕЗ ИНВЕРСИИ НАСЕЛЕННОСТЕЙ

Исследуются свойства мод оптического резонатора с резонансно-поглощающим веществом в рамках одномодовой и многомодовой полуклассических моделей взаимодействия света с веществом. В режиме сильной связи поля и вещества вблизи линии поглощения возникают поляритонные моды, свойства которых сильно зависят от соотношения параметров резонатора и среды. Показано, что моды оптического резонатора приобретают новые интересные свойства. Предложен и теоретически исследован способ возбуждения поляритонных мод.

Ключевые слова: оптический резонатор, поляритонные моды, сильная связь.

Оптический резонатор с резонансно-поглощающим веществом. Размещение поглощающего вещества в оптическом резонаторе на первый взгляд лишено смысла. Поглощение увеличивает скорость затухания поля, которое имеет место вследствие потерь (выход излучения через зеркала), и ухудшает свойства резонатора. Однако кажущаяся простой ситуация значительно усложняется, если принять во внимание когерентность поляризации резонансной поглощающей среды.

Поведение такой системы зависит от соотношения между „кооперативным“ временем среды, временем релаксации среды и временем жизни излучения в резонаторе: если „кооперативное“ время среды больше, чем время релаксации поляризации среды и затухания поля в резонаторе, то энергия, передаваемая полем веществу, не может вернуться обратно к полю (режим *слабой связи*). Наоборот, если „кооперативное“ время среды меньше или сравнимо с временем релаксации поляризации вещества и временем затухания поля в резонаторе, то возможен сложный нестационарный процесс обмена энергией между полем и средой. Поле будет многократно поглощаться, а затем излучаться средой обратно (режим *сильной связи*). Таким образом, оказывается, что свойства резонатора с поглощающим веществом в значительной степени зависят от соотношения параметров резонатора и среды. Оптический резонатор приобретает новые свойства. В настоящей статье изучаются особенности изменения излучения и резонансно-поглощающего вещества в оптическом резонаторе в этих условиях.

Аналитически свойства такой системы исследованы в рамках локальной одномодовой полуклассической модели, которая описывается системой уравнений Максвелла — Блоха [1—3]:

$$\frac{d^2}{dt^2} E + \frac{1}{\tau} \frac{dE}{dt} + \omega_r^2 E = -4\pi \frac{d^2}{dt^2} P; \quad (1)$$

$$\frac{d^2}{dt^2} P + \frac{2}{T_2} \frac{dP}{dt} + \omega_{12}^2 E = \frac{2\omega_{12}d_{12}^2}{\hbar} E(t)N(t); \quad (2)$$

$$\frac{dN}{dt} + \frac{1}{T_1} (N - N_0) = -\frac{2}{\hbar\omega_{12}} E(t) \frac{dP}{dt}, \quad (3)$$

где $E(t)$ — напряженность электрического поля в резонаторе, $P(t)$ — поляризация вещества, $N(t)$ — разность населенностей, τ — время жизни излучения в резонаторе, ω_r — частота резонатора, ω_{12} — частота резонансного перехода вещества, T_1 — время релаксации разности населенностей, T_2 — время релаксации поляризации, d_{12} — дипольный момент перехода, N_0 — разность населенностей при отсутствии электрического поля, \hbar — постоянная Планка.

Для случая когда значение $E(t)$ мало и изменением $N(t)$ можно пренебречь ($N = N_0$), получены аналитические выражения, характеризующие свойства мод резонатора. Выражение для собственных частот Ω_{\pm} -поляритонных мод системы „поле + вещество“ имеет вид [3]

$$\Omega_{\pm} = \frac{1}{2} \left[(\omega_r + \omega_{12}) + \left(\frac{1}{2\tau} + \frac{1}{T_2} \right) i \pm \sqrt{(\omega_r - \omega_{12})^2 + 4\omega_{\text{coop}}^2 - \frac{1}{4} \left(\frac{1}{\tau} - \frac{2}{T_2} \right)^2} + (\omega_r - \omega_{12}) \left(\frac{1}{\tau} - \frac{2}{T_2} \right) i \right]. \quad (4)$$

При $\omega_r = \omega_{12}$ выражение (4) упрощается:

$$\Omega_{\pm} = \omega_{12} + \frac{1}{2} \left(\frac{1}{2\tau} + \frac{1}{T_2} \right) i \pm \frac{1}{2} \sqrt{4\omega_{\text{coop}}^2 - \left(\frac{1}{2\tau} - \frac{1}{T_2} \right)^2}.$$

Здесь ω_{coop} — „кооперативная“ частота среды [3—7]:

$$\omega_{\text{coop}} = \sqrt{2\pi\omega_{12} \frac{d_{12}^2}{\hbar} N_0}.$$

Если $\omega_{\text{coop}} \geq \frac{1}{4} \left| \frac{1}{\tau} - \frac{2}{T_2} \right|$, то вместо одной частоты продольной моды резонатора возникнут два нормальных колебания с близкими частотами. Данное неравенство определяет условие сильной связи между полем и веществом в резонаторе [3—7].

Интересно, что время жизни моды в резонаторе без вещества отличается от времени жизни моды в заполненном резонаторе в режиме сильной связи, когда скорость затухания моды определяется выражением

$$\text{Im}(\Omega_{\pm}) = \frac{1}{4} \left(\frac{1}{\tau} + \frac{2}{T_2} \right).$$

При $T_2 \ll \tau$ скорость затухания моды определяется временем $2T_2$. Наоборот, когда $T_2 \gg \tau$, скорость затухания моды определяется временем 4τ , что в 2 раза больше соответствующего времени для резонатора без вещества. Отметим, что факт увеличения времени жизни поляритонной моды до 2 раз справедлив и для сильных полей, когда нельзя пренебречь изменением разности населенностей [3]. Это подтверждается численным решением системы уравнений Максвелла — Блоха (1)—(3) [3].

Возбуждение поляритонных мод с помощью излучения лазера с периодической модуляцией фазы. Рассмотренная одномодовая модель может быть применена к активно изучаемым в последние годы микрорезонаторам, содержащим поглощающие центры (квантовые ямы и точки) в режиме сильной связи между полем и веществом [4, 5, 8—11]. При накачке ультракоротким лазерным импульсом такая система представляет собой устройство нового типа — поляритонный лазер, который излучает когерентный свет без инверсии населенностей и существенно отличается по свойствам от обычного лазера [4, 5, 8—11].

Авторами предложен эффективный *неадиабатический* способ накачки поляритонных лазеров (поляритонных мод) с помощью излучения, обладающего фазовой синхронизацией мод (FM mode-locking) [3]. Электрическое поле накачки при этом описывается выражением

$$E(t) = E_0 \cos(\omega_{12}t + \Delta_0 t + \Theta \sin(f_M t)), \quad (5)$$

где E_0 — амплитуда поля, Δ_0 — коэффициент отклонения частоты накачки, Θ — амплитуда фазовой модуляции, f_M — частота модуляции.

Мгновенное отклонение частоты изменения величины $E(t)$ от частоты атомного перехода определяется как

$$\Delta(t) \equiv \omega(t) - \omega_{12} = \Delta_0(1 + m \cos(f_M t)), \quad m \equiv \frac{\Theta f_M}{\Delta_0}.$$

Такое поле имеет широкий линейчатый эквидистантный спектр с межмодовым интервалом f_M . Предлагаемый метод особенно эффективен при совпадении каких-либо двух частот накачки с поляритонными частотами. Метод позволяет использовать энергию *всех мод излучения лазера накачки*.

Пример численного решения системы уравнений (1)—(3) при FM-накачке (см. выражение (5)) представлен на рис. 1 и 2 для следующих параметров системы: $T_1 = T_2 = 20$ нс, $d_{12} = 6,3 \cdot 10^{-18}$ ед. СГСЭ, $N_0 = 2 \cdot 10^{12}$ см $^{-3}$, $\omega_{\text{соор}} = 3,76 \cdot 10^{10}$ рад/с, $\tau = 100$ нс, $E_0 = 21$ ед. СГСЭ, $f_M = 2\omega_{\text{соор}}$, $m = 0,99$, $\Delta_0 = 2035\omega_{\text{соор}}$. Решения имеют следующие особенности. Динамика разности населенностей $N(t)$ (см. рис. 1) имеет неадиабатический характер (резкие скачки), что выражается в появлении „ступенек“ на кривой $N(t)$ (некоторые из них выделены). Это происходит при $\Delta(t) \approx 0$. Генерация поляритонных мод ($I(t) = |E(t)|^2$) происходит без инверсии населенностей. Приведенная на рис. 2 картина спектра ($S(\omega)$) показывает, что интенсивность поляритонных мод (сплошные линии) оказывается выше интенсивности отдельных компонентов возбуждающего излучения (штриховые линии).

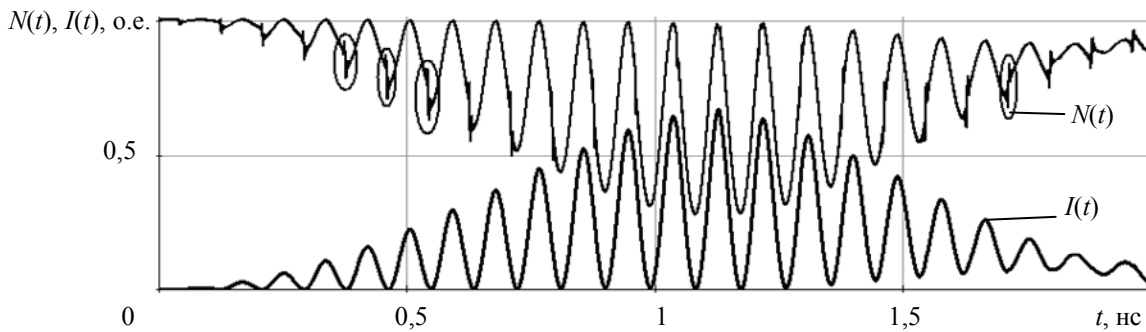


Рис. 1

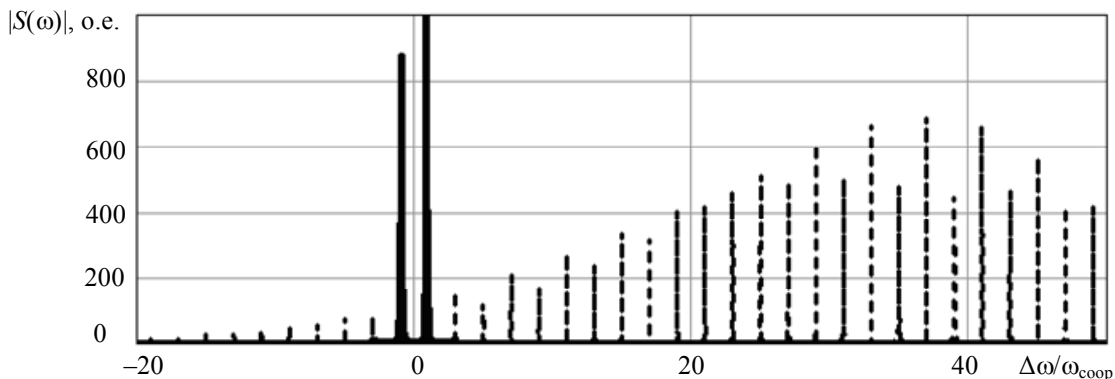


Рис. 2

На рис. 3 приведена зависимость отношения (Z) энергии генерации поляритонных мод в FM- и AM-режимах от длительности (τ) FM-импульса накачки при фиксированных значениях

энергии накачки W . Длительность АМ-импульса накачки 200 фс. Отклонение центра спектра ультракороткого импульса накачки от частоты резонанса среды составляет 5,07 нм.

Согласно расчетам при FM-способе накачки эффективность возбуждения поляритонного лазера возрастает в 10^6 — 10^{12} раз.

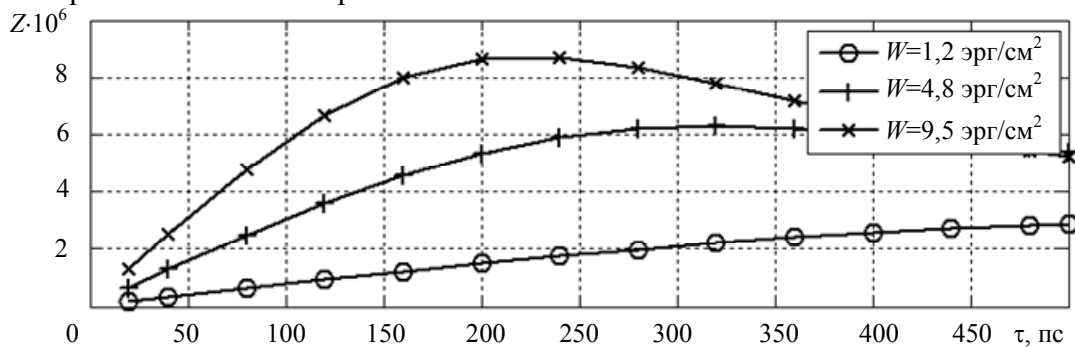


Рис. 3

Исследованный эффект позволяет использовать лазерные диоды малой мощности для накачки оптоинформационных поляритонных лазеров.

Многомодовая распределенная модель резонатора с резонансно-поглощающим веществом. В рассмотренной одномодовой модели не учитываются эффекты межмодового взаимодействия в многомодовых системах и эффекты, возникающие при распространении света в протяженной среде. Кроме того, резонатор с поглощающей средой может содержать усиливающую среду. В этом случае необходимо использовать распределенную (многомодовую) модель, при построении которой учитываются многомодовый режим генерации, процессы межмодовой конкуренции, режимы самосинхронизации мод и др., а также использовать общую систему уравнений, учитывающую эффекты распространения света в протяженных средах.

Такая модель была построена авторами для кольцевого лазера [12]. Лежащая в основе распределенной модели система уравнений для медленно меняющихся синфазной (A) и квадратурной (B) амплитуд электрического поля, поляризаций P_c и P_s и разности населенностей $\Delta\rho$ имеет следующий вид [1, 2, 12]:

$$\begin{aligned} \frac{d}{dt} P_c(t) &= -\frac{P_c}{T_2} - \Delta\omega P_s(t) - \frac{d_{12}}{2\hbar} \Delta\rho(t) B(t); \\ \frac{d}{dt} P_s(t) &= -\frac{P_s}{T_2} + \Delta\omega P_c(t) + \frac{d_{12}}{2\hbar} \Delta\rho(t) A(t); \\ \frac{d}{dt} \Delta\rho &= -\frac{\Delta\rho - \Delta\rho_0}{T_1} - \frac{2d_{12}}{\hbar} (A(t)P_s(t) - B(t)P_c(t)); \\ \frac{\partial A(z,t)}{\partial t} + c \frac{\partial A(z,t)}{\partial z} &= -4\pi\omega d_{12} N_0 P_s(z,t); \\ \frac{\partial B(z,t)}{\partial t} + c \frac{\partial B(z,t)}{\partial z} &= 4\pi\omega d_{12} N_0 P_c(z,t), \end{aligned}$$

где $\Delta\rho_0$ — равновесная разность населенностей, N_0 — концентрация вещества, c — скорость света.

Численные расчеты проводились в целях исследования времени жизни излучения на частотах вблизи линии поглощения и для моделирования причин появления эффекта „конденсации“ спектра. Эффект заключается в возникновении сильного излучения вблизи линий поглощения в спектре широкополосного лазера [6, 7]. Несмотря на большое число экспериментальных исследований и теоретических объяснений, до сих пор нет четкой ясности о

доминирующих механизмах возникновения эффекта. В работах [6, 7] для объяснения этого эффекта указывалось на необходимость учета когерентного характера взаимодействия света и вещества, а также наличия режима сильной связи.

Проведенные численные расчеты с использованием распределенной модели лазера показали, что эффект „конденсации“ спектра возникает, когда реализуется режим когерентного взаимодействия света и вещества при значениях параметров T_1 , T_2 , d_{12} , N_0 , близких к реализуемым в реальном эксперименте. Результаты расчета представлены на рис. 4, где показана временная эволюция спектра генерации ($\omega_{\text{соор}} = 4,5 \cdot 10^{10}$ рад/с, $T_2 = 5$ нс, длина резонатора 3 см). Линия поглощения смещена относительно максимума спектра усиления активной среды на -100 ГГц.

Таким образом, гипотеза о когерентном характере взаимодействия света и вещества, как одна из причин возникновения эффекта „конденсации“ спектра, получила еще одно теоретическое подтверждение.

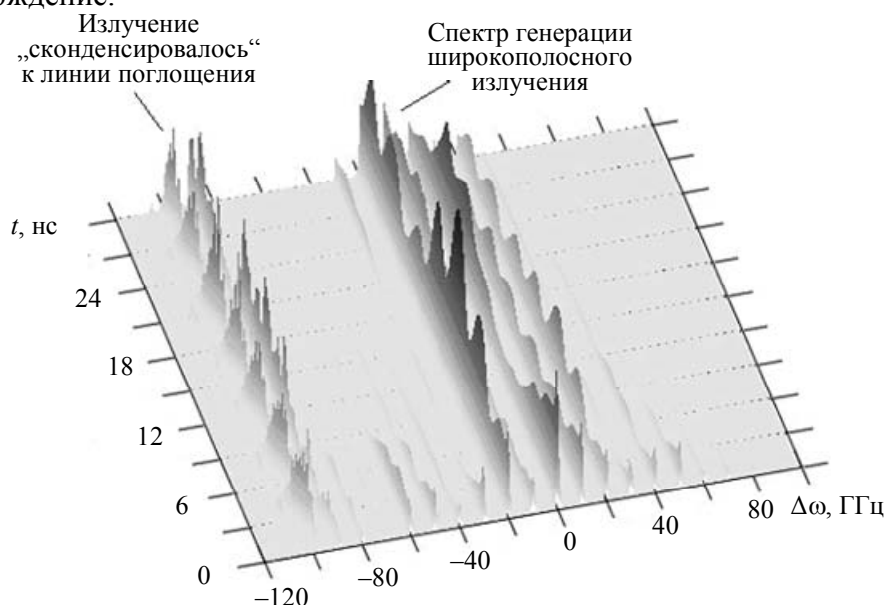


Рис. 4

Результаты расчетов на основе распределенной модели показали также, что время жизни мод, находящихся вблизи линии поглощения вещества в резонаторе в режиме сильной связи, оказывается больше времени жизни излучения в резонаторе без вещества и времени жизни излучения в режиме слабой связи. Также наблюдается перекачка энергии от мод, располагающихся вдали от линии поглощения, в поляритонные моды, располагающиеся вблизи линии поглощения. Перечисленные факторы могут служить объяснением причин возникновения эффекта „конденсации“ спектра.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ярив А. Квантовая электроника. М.: Сов. Радио, 1980.
2. Стейнфелд Дж. Лазерная и когерентная спектроскопия. М.: Мир, 1982.
3. Архипов Р. М., Егоров В. С., Чехонин И. А. Неадиабатические явления в оптоинформационных поляритонных лазерах // Науч.-техн. вестн. СПбГУ ИТМО. 2009. № 4(62). С. 53—59.
4. Brehier A., Parashkov R., Lauret J. S., Deleporte E. Strong exciton-photon coupling in a microcavity containing layered perovskite semiconductors // Appl. Phys. Lett. 2006. Vol. 89, N 171110. P. 89—91.
5. Tawara T., Gotoh H., Akasaka T. Control of exciton-photon coupling in GaN-based microcavities // NTT Techn. Rev. 2005. Vol. 3, N 12. P. 27—35.

6. Васильев В. В., Егоров В. С., Чехонин И. А. Параметрическое возбуждение кооперативных эффектов в опытах по внутрирезонаторной спектроскопии // Оптика и спектроскопия. 1985. Т. 58, № 4. С. 944—946.
7. Багаев С. Н., Егоров В. С., Морошкин П. В., Федоров А. Н., Чехонин И. А. Усиление и генерация в двухуровневых оптически плотных резонансных средах без инверсии заселенностей на основе кооперативных явлений при взаимодействии света и вещества // Оптика и спектроскопия. 1999. Т. 86, № 6. С. 912—917.
8. Klimov V. I. Nanocrystal quantum dots. From fundamental photophysics to multicolor lasing // Los Alamos Sci. 2003. N 28. P. 214—220.
9. Saba M., Kundermann S., Ciuti C., Guillet T., Staehli J. L., Deveaud B. Polariton amplification in semiconductor microcavities // Phys. Stat. Sol. B. 2003. Vol. 238, N 3. P. 432—438.
10. Bajoni D., Wertz E., Senellart P., Miard A., Semenova E., Lemaître A., Sagnes I., Bouchoule S., Bloch J. Excitonic polaritons in semiconductor micropillars // Acta Physica Polonica A. 2008. Vol. 114. P. 933—943.
11. Kasprzak J., Richard M., André R., Le Si Dang. Bose — Einstein condensation in semiconductors: myth or reality? // J. of the European Optical Society. 2008. Vol. 3, N 08023. P. 08023-1—08023-3.
12. Архипов Р. М., Егоров В. С., Чехонин И. А., Чехонин М. А., Багаев С. Н. Свойства мод оптического резонатора с резонансно-поглощающим веществом // Тр. VI Междунар. конф. „Фундаментальные проблемы оптики – 2010“. СПб. С. 112—115.

Сведения об авторах

- Ростислав Михайлович Архипов** — аспирант; Санкт-Петербургский государственный университет, кафедра оптики; E-mail: arhipm@mail.wplus.net
- Михаил Викторович Архипов** — канд. физ.-мат наук; Санкт-Петербургский государственный университет, кафедра оптики; E-mail: arhipm@mail.wplus.net
- Валентин Семенович Егоров** — д-р физ.-мат наук, профессор; Санкт-Петербургский государственный университет, кафедра оптики; E-mail: valentin_egorov@mail.ru
- Игорь Анатольевич Чехонин** — канд. физ.-мат наук; Санкт-Петербургский государственный университет, кафедра оптики; E-mail: chekhonin@mail.ru
- Михаил Анатольевич Чехонин** — Санкт-Петербургский государственный университет, кафедра оптики; науч. сотрудник; E-mail: chekhonin@mail.ru
- Сергей Николаевич Багаев** — д-р физ.-мат наук, профессор; Институт лазерной физики Сибирского отделения РАН, Новосибирск; академик РАН, директор; E-mail: bagayev@laser.nsc.ru

Рекомендована кафедрой оптики СПбГУ

Поступила в редакцию 07.02.11 г.

Г. Э. РОМАНОВА, П. С. ЧЕЧУРОВ

МОДЕЛИРОВАНИЕ ВТОРИЧНОЙ ОПТИКИ ДЛЯ СВЕТОДИОДОВ НА ОСНОВЕ ЛИНЗ С ЭФФЕКТОМ ПОЛНОГО ВНУТРЕННЕГО ОТРАЖЕНИЯ

Представлен пример моделирования линзы с эффектом полного внутреннего отражения для мощных светодиодов. Показан процесс моделирования в программе Zemax, исследовано влияние формы внутренней и внешней поверхностей сложной линзы на характеристики системы.

Ключевые слова: светодиоды, осветительные системы, вторичная оптика, сложная линза, эффект ПВО, моделирование.

В настоящее время светодиоды, используемые для освещения, занимают наряду с другими источниками уверенную позицию на рынке осветительных систем. Светодиодные светильники, прожекторы и другая осветительная техника, получившие широкое распространение, активно применяются для создания искусственного освещения, декоративной подсветки, для ландшафтного и архитектурного освещения, а также при оформлении рекламных объектов. В этой сфере зачастую используются сверхмощные светодиоды белого свечения с большим углом рассеяния ($\sim 100\text{—}120^\circ$ по уровню относительной силы света 0,5). Решение задачи освещения требует получения световых пучков с разными углами рассеяния. С этой целью светодиоды снабжают вторичной оптикой — линзой (или отражателем), обеспечивающей требуемое распределение светового потока в пространстве. Ведущие мировые производители предлагают стандартные серии линз с определенными диаграммами направленности излучения, показанными, в частности, на рис. 1 [1]: *a* — узкая, *b* — средняя, *в* — широкая.

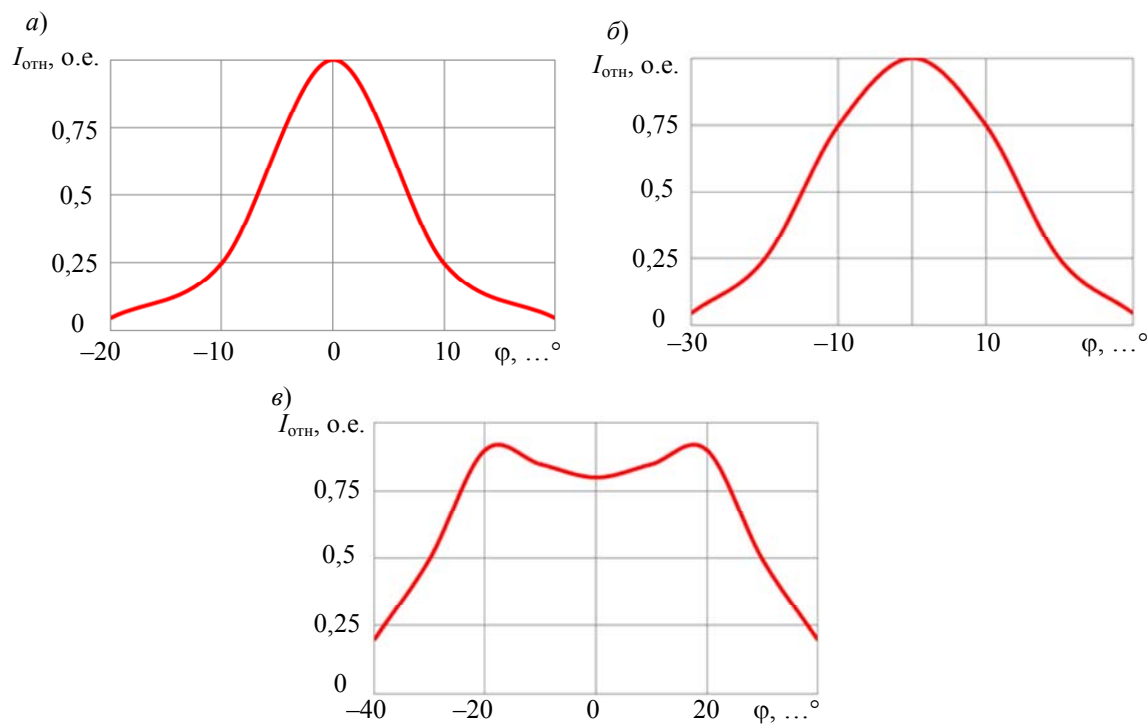


Рис. 1

Необходимо отметить, что вторичная оптика рассчитывается применительно к определенному типу светодиода. С другими светодиодами она не будет обеспечивать требуемую ширину пучка излучения, также зачастую освещаемая область будет неравномерной и возможно

появление дополнительных колец. Поэтому в связи с активным распространением новых светодиодов возникает задача расчета и моделирования вторичной оптики, совместимой с ними [2].

В настоящей статье рассматриваются особенности моделирования линзы с эффектом полного внутреннего отражения для светодиода с использованием системы автоматизированного проектирования оптических систем. Внешний вид линзы показан на рис. 2, а принцип ее действия — на рис. 3.

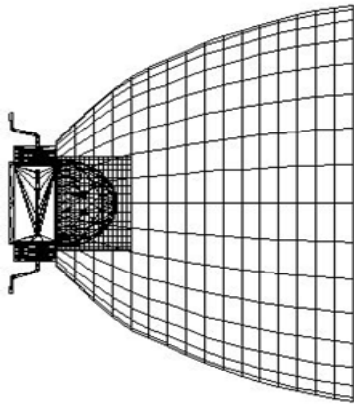


Рис. 2

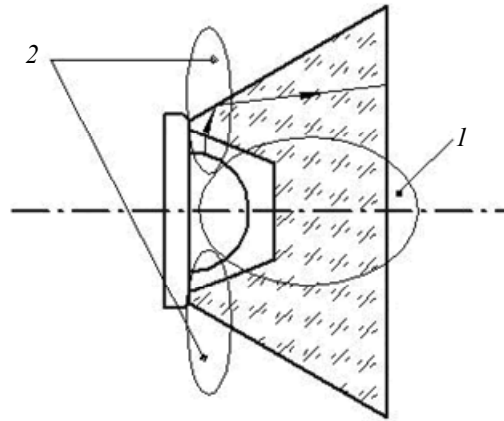


Рис. 3

Моделируемую оптику можно рассматривать как сложную линзу, в которой основными являются две поверхности: внутренняя преломляющая и внешняя отражающая. Функция внешней поверхности линзы заключается в отражении падающего на нее света и формировании требуемого распределения светового потока в пространстве. Так как светодиод излучает в пределах достаточно широкого угла (более 100°), то световой пучок условно можно разбить на „центральную“ и „крайнюю“ зоны (соответственно поз. 1 и 2 на рис. 3). Часто излучение „крайней“ зоны не используется, что приводит к снижению эффективности осветительной системы. Функция внутренней поверхности линзы заключается в преломлении лучей на краю поля излучения светодиода и обеспечении угла полного внутреннего отражения на внешней поверхности линзы для этих лучей.

Данная конструкция обеспечивает уменьшение габаритов осветительной системы и позволяет увеличить световую эффективность за счет более полного использования излучения источника. При этом конструкция обладает технологическими преимуществами при изготовлении, поскольку не требует нанесения отражающего покрытия и может быть получена литьем под давлением в специальную матрицу.

Подобного типа системы необходимо моделировать в режиме непоследовательного расчета хода луча (Non-Sequential Mode), используя, например, программу Zemax.

Для моделирования формы линзы можно использовать объекты, имеющие различные типы геометрических поверхностей, например конус, цилиндр, параболоид и др. В качестве источника излучения можно использовать как упрощенные модели (точечный источник, излучающая поверхность), так и модели реального источника. Для точного моделирования, естественно, необходимо использовать модель источника, содержащую его физические параметры и информацию о световом распределении. Часто такие модели в форматах DAT и IES представлены в свободном доступе на сайте производителя светодиодов. Для оценки фотометрических характеристик системы необходимо использовать приемник излучения, для которого можно задать требуемый размер и количество пикселей.

Для того чтобы система удовлетворяла требуемым характеристикам (угол расходимости, кривая силы света, равномерность освещенности), необходимо рассчитать конструктивные параметры вторичной оптики, используя операцию оптимизации.

Оптимизация представляет собой процесс, посредством которого можно добиться требуемых значений различных характеристик за счет изменения параметров заданной системы. Основным критерием оценки соответствия оптической системы заданным в программе ZEMAX условиям оптимизации является оценочная функция (Merit Function). Чем оценочная функция меньше, тем больше система соответствует необходимым требованиям. Время оптимизации зависит от числа изменяемых параметров системы, количества трассируемых лучей и числа пикселей приемника.

Помимо формирования требуемого распределения светового потока в пространстве, внешняя поверхность линзы также определяет габаритные размеры системы.

Как показывают расчеты, если система должна иметь широкий угол расходимости, то следует использовать линзу с конической формой внешней поверхности, если же требуется малый угол расходимости, то — линзу с параболической формой внешней поверхности или близкой к ней. При выборе между параболической формой и поверхностью Free Form Z следует учитывать, что при сопоставимых характеристиках внешняя поверхность Free Form Z может иметь более сложную форму, кроме того линза с параболической формой внешней поверхности более технологична в производстве и на ее расчет требуется значительно меньше времени.

Внутренняя поверхность линзы, которая является отверстием для светодиода, отклоняет крайние лучи светодиода на угол полного внутреннего отражения для более эффективного использования светового потока. Форма отверстия под светодиод должна выбираться исходя из условий увеличения световой эффективности линзы, а также технологичности изготовления. При выборе формы и размера внутренней поверхности следует помнить, что не рекомендуется сопрягать поверхность линзы с первичной оптикой светодиода, так как это может вызвать ее чрезмерный нагрев, деформацию и обрыв токовода. Также следует учесть, что необходимо сформировать упорный край линзы, которым она будет базироваться на светодиоде.

Сравнительный анализ характеристик линз с различной формой внутренней поверхности позволяет сделать следующие выводы:

- форма оптимизированной внутренней поверхности, за исключением сферы, не влияет существенно на форму пучка излучения, изменяется только значение его интенсивности;
- лучшими показателями максимальной осевой силы света и световой эффективности обладают поверхность произвольной формы (Free Form Z) и коническая поверхность со сферическим основанием;
- исходя из принципов технологичности конструкции предпочтение можно отдать цилиндрической поверхности со сферическим основанием [3, 4].

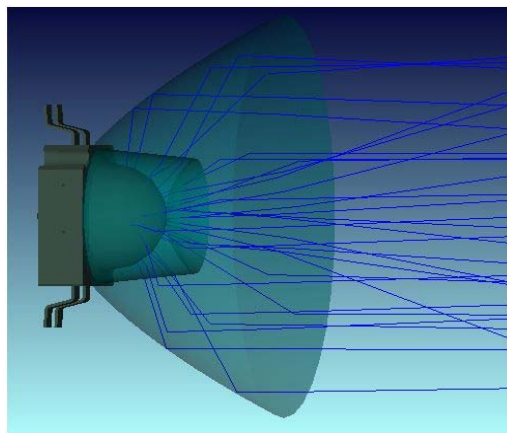


Рис. 4

В качестве примера представим рассчитанную вторичную оптику для светодиода серии Luxeon K2 TFFC (рис. 4). Линза имеет параболическую внешнюю и цилиндрическую внутрен-

ную поверхности. Данная осветительная система имеет угол расходимости 12° и осевую силу света 1830 кд.

Диаграмма направленности и пятно рассеяния системы показаны на рис. 5.

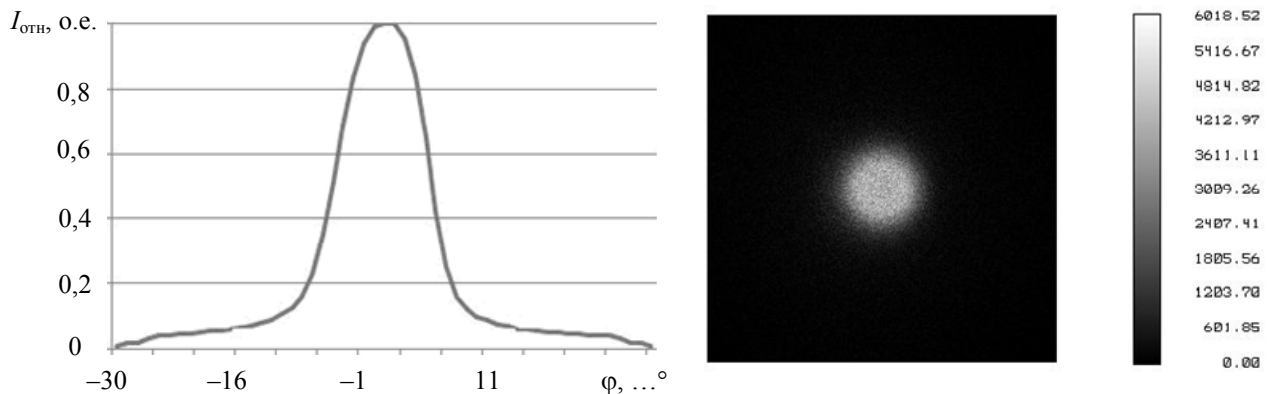


Рис. 5

В заключение необходимо отметить, что моделирование светодиодных осветительных систем в последнее время становится все более актуальным. В связи с тенденцией повсеместной замены существующего освещения на энергоэффективные объемы разработок и производства таких систем увеличиваются [1].

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Справочная книга по светотехнике / Под ред. Ю. Б. Айзенберга. М.: Знак, 2006. 972 с.
2. Schubert E. F. Light-Emitting Diodes. Cambridge University Press, 2006. 422 p.
3. Zemax. Optical Design Program: User's Guide. 2009. 766 p.
4. Zemax. Users' Knowledge Base [Электронный ресурс]: ZEMAX: Software for Optical System Design / Downloads / Support / Knowledge Base: <<http://www.zemax.com/kb/>>.

Сведения об авторах

Галина Эдуардовна Романова

— канд. техн. наук, доцент; Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, кафедра прикладной и компьютерной оптики;
E-mail: romanova_g_e@mail.ru

Павел Сергеевич Чечуров

— студент; Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, кафедра прикладной и компьютерной оптики; E-mail: ChechurovPS@gmail.com

Рекомендована кафедрой
прикладной и компьютерной оптики

Поступила в редакцию
19.04.11 г.

Л. А. ИВАНОВА, А. В. МЕЛЕШКО, В. В. ПЯТКОВ, В. А. РЕСОВСКИЙ
**МЕТОД АВТОМАТИЧЕСКОЙ КОМПЕНСАЦИИ ВИБРАЦИЙ
 В ТЕНЕВОМ ПРИБОРЕ
 С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ОПТИМАЛЬНОГО ДИСКРИМИНАТОРА**

Приводится статистическая модель структуры теневого прибора, позволяющая компенсировать паразитные вибрационные составляющие на основе применения замкнутой системы с отрицательной обратной связью.

Ключевые слова: теневой прибор, функция правдоподобия, оптимальная оценка, опорный сигнал, вибрация, ПЗС-матрица.

Одним из способов компенсации вибраций в теневых приборах является анализ изменения интегральной интенсивности освещенности фотоприемного устройства (ПЗС-матрицы), расположенного в фокальной плоскости или в плоскости пятна рассеяния оптического изображения. Размер рабочей площади приемника в общем случае равен рабочей поверхности фотодиодного массива. При вибрациях, обусловленных физическими явлениями различной природы, происходит отклонение линии визирования от оси источника излучения на величину β , которую и следует скомпенсировать для обеспечения заданных режимов работы теневого прибора. Для построения компенсационной схемы теневого прибора сформируем структуру канала оценивания величины отклонения β .

Статистическая модель канала. В общем случае статистическую модель системы передачи сигнала можно представить в виде, приведенном на рис. 1.

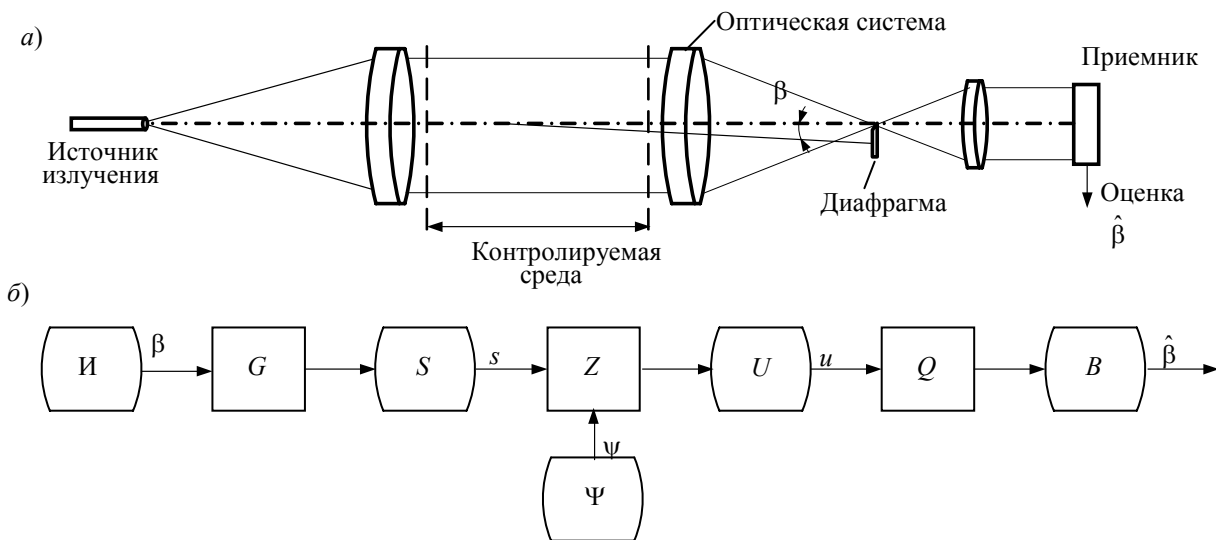


Рис. 1

На основе физической модели (рис. 1, а) передачи и приема сигнала разработана статистическая модель (рис. 1, б), которая включает в себя следующие основные элементы. Сигнал $s = G(\beta)$ источника излучения И зависит от угла β . Оператор G определяет способ формирования сигнала. Оператор S описывает пространство, которое составляет множество всех сигналов s . Далее сигнал проходит через контролируемую среду распространения, в которой на него воздействуют помехи ψ , образующие пространство Ψ . Сигнал, поступающий на вход приемника, можно представить в виде некоторого оператора Z :

$$u = Z(s, \psi). \quad (1)$$

Статистика помех и оператор U , определяющий преобразование оптической системы при предварительном синтезе оцениваемых систем, считаются известными, т.е. известна плотность распределения принимаемого сигнала u при каждом переданном сигнале s . Приемник производит над принимаемым сигналом u операцию Q , такую что на его выходе формируется оценка $\hat{\beta}$ параметра β , принадлежащая множеству B :

$$\hat{\beta} = Q\{Z[G(\beta); \psi]\}. \quad (2)$$

Синтез структуры канала. Оценка $\hat{\beta}$ является случайной величиной, и качество оценивания может быть задано посредством некоторой статистической характеристики. Общее выражение для показателя качества системы можно записать в следующем виде [1]:

$$\Delta = \int_B \int_{\hat{B}} h(\hat{\beta}; \beta) \omega(\beta) \omega(\hat{\beta} / \beta) d\beta d\hat{\beta}. \quad (3)$$

Функция $h(\hat{\beta}; \beta)$, имеющая значение функции потерь, определяет относительную значимость (или ценность) расхождения оценки $\hat{\beta}$ и заданного угла β . Соответственно $\omega(\hat{\beta} / \beta)$ — условная плотность вероятности распределения $\hat{\beta}$ при фиксированном значении β , $\omega(\beta)$ — априорная плотность вероятности распределения параметра β . Величина Δ характеризуется как средний риск: качество системы тем выше, чем меньше средний риск. Оптимизация системы соответственно сводится к минимизации среднего риска, т.е. к решению уравнения $\Delta = \min$.

В большинстве прикладных задач функцию потерь задают таким образом, чтобы, во-первых, она отражала функциональную задачу оптимизируемой системы, а во-вторых, была монотонной, удобной при проведении над ней математических операций. Выберем получившую наибольшее распространение на практике квадратичную функцию потерь вида

$$h(\hat{\beta}; \beta) = (\hat{\beta} - \beta)^2. \quad (4)$$

Следует заметить, что при вибрационном смещении пятна рассеяния оптического изображения в двух плоскостях на фотоприемном устройстве аналогом скалярной квадратичной функции потерь (см. формулу (3)) будет квадратичная форма:

$$h(\hat{\beta}; \beta) = \sum_{i,j}^2 \alpha_{i,j} (\hat{\beta}_i - \beta_i)(\hat{\beta}_j - \beta_j), \quad (5)$$

где $\|\alpha_{ij}\|$ — некоторая симметричная неособенная матрица.

Выбранная функция потерь (4), а также показатель качества (3) сводят оптимизацию системы к решению задачи оценивания параметра β .

При квадратичной функции потерь (4) или (5) качество системы будет оцениваться параметром [1]

$$\Delta = \int_B \int_{\hat{B}} (\hat{\beta} - \beta)^2 \omega(\beta) \omega(\hat{\beta} / \beta) d\beta d\hat{\beta} = \int_U du \int_B (\hat{\beta} - \beta)^2 \omega(\beta) \omega(u / \beta) d\beta, \quad (6)$$

где $\omega(u / \beta)$ — функция правдоподобия.

Оптимальную оценку $\hat{\beta}_{\text{опт}}$ можно определить из решения системы уравнений

$$\frac{\partial}{\partial \beta_i} \Delta = 0, \quad i = 1, 2. \quad (7)$$

Прямым методом получения оценки $\hat{\beta}_{\text{опт}}$ является формирование на множестве B возможных значений измеряемого параметра β функции правдоподобия $\omega(u / \beta)$ или связанной с параметром β другой оптимальной функции $F(\beta)$, представляющей собой произвольную монотонную функцию от $\omega(u / \beta)$, а также нахождение точки, в которой эта функция достигает

наибольшей величины [2]. В качестве функции $F(\beta)$ может служить интегральная освещенность фотодиодного массива приемника, величина которой зависит от взаимной ориентации источника излучения и диафрагмы (см. рис. 1).

В общем случае решение (7) приводит к построению многоканальной системы оценивания, в каждом канале которой формируется функция $F(\beta)$ при фиксированном значении измеряемого параметра β [1]. В состав многоканальной системы также должно входить решающее устройство, формирующее оценку максимального правдоподобия. Число m независимых каналов приема должно быть таким, чтобы набор дискретных значений $F(\beta_k)$, $k = 1 \dots m$, с достаточной для практики точностью воспроизводил функцию $F(\beta)$ на множестве B . Однако структура такой оценивающей системы получается сложной. К тому же оценки $\hat{\beta}$ будут принимать дискретные значения, что не всегда удобно на практике.

С учетом того, что для корректной работы системы отклонение β необходимо компенсировать, наиболее эффективным средством является использование следящей системы [3].

Положим, что задано опорное направление излучения, определяемое углом β_0 . Так как следящая система должна с высокой точностью обрабатывать вибрационные искажения ($\beta - \hat{\beta}$), будем считать, что оценка $\hat{\beta}$ должна находиться в окрестности точки максимума (β_m) функции правдоподобия $\omega(u/\beta)$. Тогда, полагая функцию $\omega(u/\beta)$ распределенной по нормальному закону и представляя эту функцию в окрестности точки β_m в виде параболической кривой, можем записать разложение функции $\ln \omega(u/\beta)$ в следующем виде:

$$\ln \omega(u/\beta) \approx \ln \omega(u/\beta_0) + (\beta - \beta_0) \frac{\partial}{\partial \beta} \ln \omega(u/\beta_0) + \frac{1}{2} (\beta - \beta_0)^2 \frac{\partial^2}{\partial \beta^2} \ln \omega(u/\beta_0). \quad (8)$$

Составляя уравнение правдоподобия

$$\frac{\partial}{\partial \beta} \ln \omega(u/\beta_m) = \frac{\partial}{\partial \beta} \ln \omega(u/\beta_0) + (\beta_m - \beta_0) \frac{\partial^2}{\partial \beta^2} \ln \omega(u/\beta_0) = 0$$

и решая его относительно β_m , имеем

$$\beta_m = \beta_0 - \frac{\partial}{\partial \beta} \ln \omega(u/\beta_0) \bigg/ \frac{\partial^2}{\partial \beta^2} \ln \omega(u/\beta_0). \quad (9)$$

Для практической схемной реализации, как упоминалось выше, вместо логарифма функции правдоподобия можно использовать оптимальную функцию освещенности $F(\beta)$ фотодиодного массива приемника. Производя операции, аналогичные (8) и (9), получаем

$$\beta_m = \beta_0 - \frac{\partial}{\partial \beta} \ln F(\beta_0) \bigg/ \frac{\partial^2}{\partial \beta^2} \ln F(\beta_0). \quad (10)$$

Таким образом, при нахождении оценки максимального правдоподобия следует определить две первые производные функции $F(\beta)$ при $\beta = \beta_0$. В этом случае следует использовать следящую систему с отрицательной обратной связью. Вторые слагаемые в формулах (9) и (10) представляют собой выражения для оптимальных дискриминаторов [3].

Функциональная схема теневого прибора с компенсацией вибраций. В соответствии с проведенным синтезом структуры разработана компенсационная схема теневого прибора (рис. 2). На рисунке представлены теневой прибор, состоящий из источника излучения, управляемой светоделительной пластины, оптической системы, коллимирующего зеркала, диафрагмы и фотоприемной матрицы. Информационный сигнал формируется в просмотровом объеме, расположенном между коллимирующим зеркалом и оптической системой. Вибрационное воздействие без нарушения общности можно считать приложенным к коллимирующему зеркалу. Фотоприемная матрица формирует массив, представляющий собой совокупность информационного сигнала и сигнала, обусловленного вибрационным воздействием. В соответствии с вы-

ражением (10) в электронном блоке определяется управляющий сигнал, под воздействием которого осуществляется поворот светоделительной пластины. Результатом управления является компенсация вибрационных влияний на оптический блок теневого прибора.

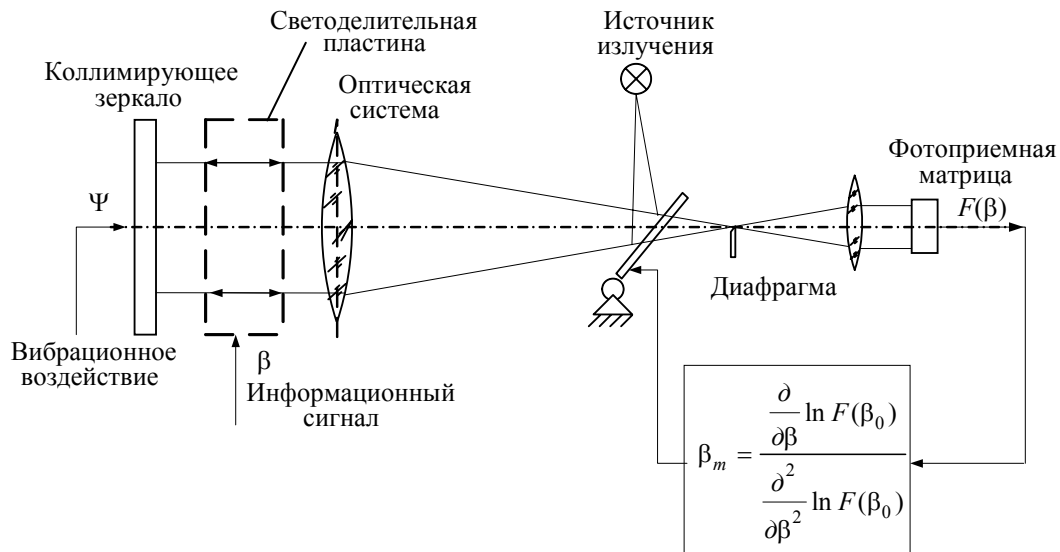


Рис. 2

Выводы. Таким образом, произведен синтез алгоритма получения оптимальной оценки отклонения параллельного пучка лучей в теновом приборе, обусловленного вибрационным воздействием на элементы конструкции прибора.

Структура теневого прибора, построенная в соответствии с синтезированным алгоритмом, предполагает наличие опорного сигнала и разностного сигнала с выхода дискриминатора. В качестве опорного сигнала следует использовать заданную интегральную освещенность на матричном фотоприемнике, а компенсационный канал следует строить на основе замкнутой следящей системы с отрицательной обратной связью.

Работа выполнена в рамках целевой программы „Механотроника и создание микросистемной техники“, мероприятие 1.2.1.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Фалькович С. Е. Оценка параметров сигнала. М.: Сов. радио, 1970. 336 с.
2. Бачевский С. В., Иванова Л. А., Пятков В. В., Ресовский В. А. Влияние вибрационных помех на работу теневого прибора и возможные методы их снижения // Материалы междунар. науч.-техн. конф. „Системы и процессы управления и обработки информации“, 22—27 мая 2010 г. СПб: СЗТУ, 2010. Т. 2. С. 499—505.
3. Мелешко А. В., Пятков В. В. Методика анализа динамических ошибок в комбинированных телевизионных следящих системах // Вопросы радиоэлектроники. Техника телевидения. 2010. Вып. 1. С. 84—89.

Сведения об авторах

- Любовь Александровна Иванова** — НИИ телевидения, Санкт-Петербург; ведущий инженер;
E-mail: vlaluba@yandex.ru
- Алла Вячеславовна Мелешко** — канд. техн. наук; ВНИИ радиоаппаратуры, Санкт-Петербург;
E-mail: allaluna@list.ru
- Вячеслав Викторович Пятков** — д-р техн. наук, профессор; НИИ телевидения, Санкт-Петербург;
E-mail: pyatkov1955@mail.ru
- Владимир Алексеевич Ресовский** — канд. техн. наук, доцент; НИИ телевидения, Санкт-Петербург;
E-mail: vlares@yandex.ru

Рекомендована кафедрой радиотехники Института интеллектуальных электронных систем СЗТУ

Поступила в редакцию 23.08.11 г.

Б. П. КУЗЬМИН, Н. К. МАЛЬЦЕВА, А. В. МИНИН

ИНТЕРФЕРОМЕТР-РЕФРАКТОМЕТР ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ СОСТАВА ГАЗОВЫХ И ЖИДКИХ ПРОБ

Рассматривается интерференционный рефрактометр, используемый для реализации нового метода, позволяющего определить состав и свойства химических растворов в технологических линиях очистки и синтеза химических веществ различного класса. Показаны преимущества детектора по сравнению с существующими разработками.

Ключевые слова: рефрактометр, показатель преломления, интерферометр.

Анализ возможностей интерференционного метода измерения разности показателей преломления и недостатков его технической реализации позволил авторам предложить новое техническое решение этого метода применительно к исследованию сверхмалых количеств оцениваемого вещества в газообразной или жидкой фазе. Суть предлагаемого в настоящей статье решения заключается в сочетании гониометрического и интерференционного методов измерения разности показателей преломления жидкостей или газов в дифференциальной оптической кювете [1]. В оптической системе рефрактометра применена классическая схема интерферометра Майкельсона [2], работающего в режиме полос равной толщины. Существенным и принципиальным отличием предложенного решения является использование в качестве делительного элемента в интерферометре Майкельсона дифференциальной проточной оптической кюветы призматического типа с углом 45° при вершине. Делительная грань кюветы представляет собой полупрозрачную пластину.

Оптическая схема действующего образца рефрактометра показана на рис. 1. Оптическое излучение источника I (полупроводникового лазерного диода) с помощью коллиматора 2 формируется в параллельный пучок и направляется через ячейки кювет 3 и 4 на зеркала 5 и 6 . Отраженный поток возвращается через ячейки кювет, и объективом 7 формируется интерференционная картина, представляющая собой полосы равной толщины. В плоскости локализации интерференционной картины устанавливается фотоэлектрический преобразователь 8 . Ход лучей в оптической кювете и условия формирования полос равной толщины показаны на рис. 2. При прохождении параллельного пучка лучей через кюветы призматического типа, при наличии в их ячейках веществ с различными показателями преломления, угол отклонения α этого пучка на выходе из кювет описывается выражением

$$\sin \alpha = \sin \beta \left(\pm n_1 \cos \beta \pm \sqrt{n_2^2 n_1^2 \sin^2 \beta} \right), \quad (1)$$

где n_1 , n_2 — показатель преломления жидкости (или газа) в кюветах 3 и 4 соответственно; β — угол при основании призматической кюветы.

Угол $\beta = 45^\circ$, и, следовательно, выражение (1) будет иметь вид удобный для расчета: отклонение угла β в небольших пределах не сказывается на величине угловых отклонений α на выходе из кювет:

$$\sin \alpha = 0,5 \left(n_1 \sqrt{n_2^2 n_1^2 - 1, 4n_1^2} \right). \quad (2)$$

С учетом того, что $n_2 = n_1 + \Delta n$ (Δn — разность показателей преломления), выражение (2) для расчетов угла α принимает следующий вид:

$$\alpha = \arcsin \left[0,5 \left(n_1 \sqrt{0,59n_1^2 + 4n_1 \Delta n + 2n_1^2} \right) \right]. \quad (3)$$

Параллельный пучок, ограниченный лучами 1 и 2 (см. рис. 2), после последовательного прохождения через ячейки кювет с находящимися в них жидкостью или газом, отразившись от зеркал 5 и 6 , отклоняется на выходе из кювет на угол, по абсолютной величине равный 2α . При этом лучи 1_i и 2_j , $i, j = 1, 2$, отклоняются в противоположные стороны. Следовательно, в делительном узле предложенного интерферометра-рефрактометра созданы условия для формирования полос равной толщины, идентичные условиям получения интерференционной картины в клиновидной пластине.

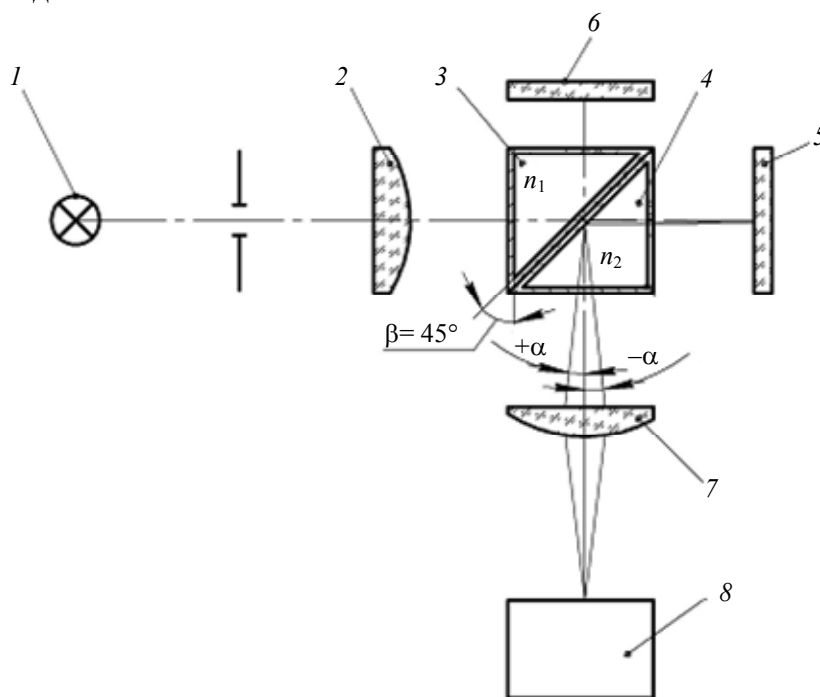


Рис. 1

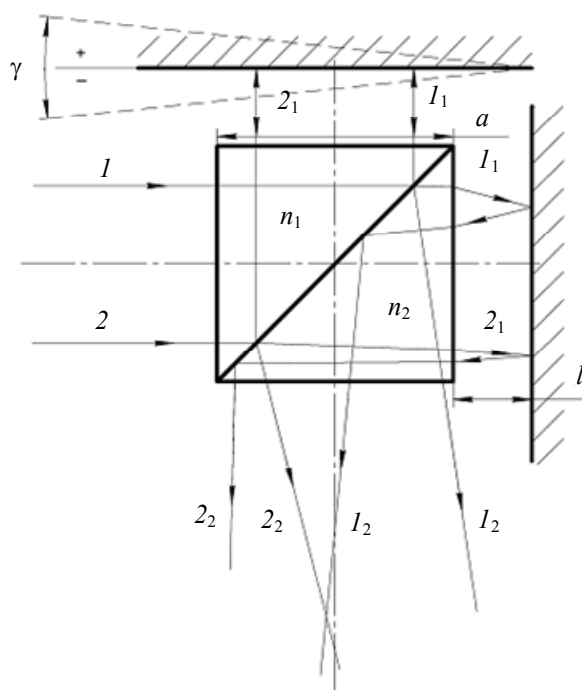


Рис. 2

Информационным параметром в рефрактометре является расстояние между интерференционными полосами, которое определяется зависимостью

$$b = \frac{\lambda}{2\gamma}, \quad (4)$$

где $\gamma=2\alpha$ — угол при вершине эквивалентного воздушного клина.

При малых угловых отклонениях светового потока выражение (1) преобразуется к виду:

$$\sin \alpha = \operatorname{tg} \beta \cdot \Delta n \quad \text{или} \quad \alpha = \Delta n, \quad (5)$$

и, следовательно, выражение (4) принимает вид

$$b = \frac{\lambda}{4\Delta n}. \quad (6)$$

Чувствительность интерференционного рефрактометра определяется выражением

$$\frac{db}{dn} = \frac{\lambda}{4(\Delta n)^2}. \quad (7)$$

Функция (7) при $\alpha=0$ представляет собой равностороннюю гиперболу, характеризующуюся действительной полуосью $C = \sqrt{\lambda/2}$, $C=0,03$ мм для $\lambda=638$ нм.

Гиперболы такого вида характеризуются высокой чувствительностью информационного параметра в ее верхней части и низкой чувствительностью в нижней. Это создает дополнительные сложности при измерении разности показателей преломления. Соответственно динамический диапазон измерения ограничен и сверху, и снизу.

В целях управления параметрами интерференционной картины в оптической системе предлагаемого интерференционного рефрактометра предусмотрена возможность предварительного разворота одного из зеркал для изменения динамического диапазона измерения разности показателей преломления. При развороте зеркала на угол γ выражение (7) принимает следующий вид:

$$b = \frac{\lambda}{4\operatorname{tg} \beta \cdot \Delta n + \gamma}. \quad (8)$$

В этом случае чувствительность рефрактометра определяется как

$$\frac{db}{dn} = \frac{\lambda}{4\operatorname{tg} \beta \cdot \Delta n + \gamma}. \quad (9)$$

Расширение динамического диапазона измерения Δn приводит к улучшению линейности сигнальной характеристики рефрактометра.

Выбор значений угла γ и параметров фотоприемного устройства обуславливает оптимальное соотношение диапазона измерения Δn и чувствительности прибора.

Из выражения (8) следует, что погрешность измерения расстояния b между интерференционными полосами зависит от изменения длины волны $\Delta\lambda$ излучающего лазера. Эта погрешность описывается выражением

$$\frac{db}{d\lambda} = k\Delta\lambda,$$

где k — приборный коэффициент, определяемый по формуле

$$k = \frac{1}{4\operatorname{tg} \beta \cdot \Delta n + \gamma}.$$

При флуктуации длины волны лазерного диода в пределах 40—50 нм расстояние между максимумами интерференционных полос изменяется на величину 10^{-4} мм, что при реализации предлагаемого метода вносит погрешность 1 % при диапазоне измерения $\Delta n \approx 10^{-8} \dots 10^{-6}$.

При измерении разности показателей преломления, кроме изменения расстояния между интерференционными полосами, происходит их одновременный сдвиг, величина которого определяется параметрами интерферометра и измеряемой разностью показателей преломления. Для определения величины сдвига интерференционных полос обратимся к рис. 2, на ко-

тором показан ход лучей в интерферометре: I, I_1, I_2 и $2, 2_1, 2_2$ — пучки лучей: соответственно входящий в кювету, отраженный и повторно проходящий кювету; геометрические параметры интерферометра следующие: l — расстояние от грани кюветы до отражающих зеркал; a — длина стороны кюветы.

Длина оптического пути осевого луча в интерферометре определяется выражением

$$L_1 = an_1 + 2l + \frac{an_2}{2 \cos \left[\beta - \arcsin \left(\frac{\sqrt{2}}{2} - \frac{n_1}{n_2} \right) \right] n_2^2},$$

а длина оптического пути луча I_2 — выражением

$$L_2 = \frac{3an_2}{2 \cos \left[\beta - \arcsin \left(\frac{\sqrt{2}}{2} - \frac{n_1}{n_2} \right) \right]} + \frac{2l}{1 - \sin^2 \left[\beta - \arcsin \left(\frac{\sqrt{2}}{2} - \frac{n_1}{n_2} \right) \right] n_2^2}.$$

Разность хода лучей ($L_2 - L_1$) определяется как

$$\Delta = a \left(\frac{n_2}{\cos \theta_1} - n_1 \right) + 2a \left(\frac{1}{\cos \theta_2} - 1 \right), \quad (10)$$

где угол θ определяется соотношением $\sin \theta = n_2 \sin \beta$.

При измерении разности показателей преломления в небольших пределах выражение (10) преобразуется к виду

$$\Delta \approx a \Delta n.$$

Например, при $a = 5$ мм и $\Delta n = 10^{-6}$ разность Δ составляет $10^{-4} \lambda$, что на несколько порядков меньше, чем изменение расстояния b между интерференционными полосами, вызванное изменением того же значения Δn .

Таким образом, с одной стороны, схема предложенного интерференционного рефрактометра по принципу действия не отличается от схем интерферометров, предназначенных для измерения угловых и линейных отклонений образца в одном из плечей интерферометра, а с другой стороны, обладает рядом существенных преимуществ. К ним следует отнести:

— независимость чувствительности измерения разности показателей преломления от объема анализируемой жидкости (оптической длины потока лучей в кюветах); возможность использования оптических кювет малого объема (до единиц микролитров), что позволяет увеличить производительность измерений;

— простота и надежность термостатирования оптической кюветы, в том числе, и всего интерферометра;

— возможность обеспечения проточного режима в оптической кювете;

— повышение чувствительности интерферометра в два раза по сравнению с классическими схемами и их вариантами.

В целях регистрации светового потока на выходе оптической схемы прибора установлен фотоэлектрический преобразователь, выполненный по принципу измерителя „амплитуда—частота“ и состоящий из узла механического прерывателя прямоугольной диафрагмы и фотоприемника с усилителем сигнала. При этом функция преобразования, установленная в электронной измерительной системе, соответствует функции изменения освещенности диафрагмы перед фотоприемником, что позволяет отслеживать изменения разности показателя преломления в реальном масштабе времени. Далее, сигнал в кодовом виде передается на персональный компьютер. С помощью оптико-механического преобразователя, установленного перед фотоприемным устройством, и программного обеспечения осуществляется выбор режима работы интерференционного рефрактометра, к которым можно отнести следующие:

— режим рефрактометра гониометрического типа с измерением угловых отклонений светового потока известными способами преобразования этих отклонений в фотоэлектрический сигнал;

— режим дисперсионного рефрактометра с установленными в плечах интерферометра интерференционными светофильтрами;

— режим обнаружения микропримесей и исследования каталитических и кинетических реакций в прозрачных растворах (режим нулевого порядка); необходимо, однако, отметить, что работа рефрактометра в этом режиме не эффективна, если $\Delta n \approx 10^{-8} \dots 10^{-5}$;

— режим интерференционного рефрактометра, работающего по способу автоматического отслеживания числа интерференционных полос; отличительной особенностью этого режима работы является использование зависимости частоты следования интерференционных полос от изменения разности показателей преломления, такой способ исключает возможность пропуска полос или ошибки при их нумерации.

Рефрактометры данного типа могут использоваться для анализа разнообразных химических реактивов, в том числе, для контроля чистоты газов и точности приготовления газовых смесей, а также для контроля допустимой концентрации вредных и взрывчатых веществ и контроля аппаратов для наркоза.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. А. с. 00792103 СССР. Фотоэлектрический способ измерения концентрации вещества / М. Л. Александров, Б. П. Кузьмин, В. А. Павленко. 1980.
2. Пейсахсон И. В. Оптика спектральных приборов. Л.: Машиностроение, 1975.

Сведения об авторах

- Борис Пантелеевич Кузьмин** — ООО „ОКБ Тест“, Санкт-Петербург; директор
- Надежда Константиновна Мальцева** — канд. техн. наук, доцент; Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, кафедра оптико-электронных приборов и систем; E-mail: maltseva@grv.ifmo.ru
- Артур Владимирович Минин** — студент; Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, кафедра оптико-электронных приборов и систем; E-mail: mavne@yandex.ru

Рекомендована кафедрой
оптико-электронных приборов и систем
НИУ ИТМО

Поступила в редакцию
22.10.11 г.

Е. Е. МАЙОРОВ, А. Ч. МАШЕК, В. Т. ПРОКОПЕНКО, Н. Я. ЧИСТЯКОВА

ИССЛЕДОВАНИЕ МЕТРОЛОГИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ИЗМЕРИТЕЛЬНОЙ ОПТИКО-МЕХАНИЧЕСКОЙ ГОЛОВКИ

Представлен анализ метрологических характеристик измерительной оптико-механической головки: исследованы диапазон измерения при контроле формы поверхности диффузно-отражающего объекта, амплитуда выходного сигнала, погрешность измерений. Приведены результаты сравнительного анализа оптико-механической головки с существующим аттестованным прибором.

Ключевые слова: оптико-механическая головка, огибающая интерференционного сигнала, пружинный параллелограммный механизм, спектр-модуляция.

Измерительная оптико-механическая головка (ОМГ), предназначенная для контроля формы поверхности диффузно-отражающих объектов, а также для томографических исследований, представляет собой сканирующий интерферометр Майкельсона с двумя подвижными зеркалами [1]. На рис. 1 приведена схема экспериментальной установки, где 1, 15 — суперлюминесцентные диоды; 2 — микрообъектив; 3, 8 — светоделители; 4 — объект; 5, 7, 9, 10, 11 — зеркала; 6, 14, 16 — фотоприемники; 12 — модулятор; 13 — дифракционные решетки; 17 — датчик скорости; 18 — блок электронной обработки сигналов; ПК — компьютер; O_1-N , O_1-M , O_2-N , O_2-L — оптические длины плеч интерферометра.

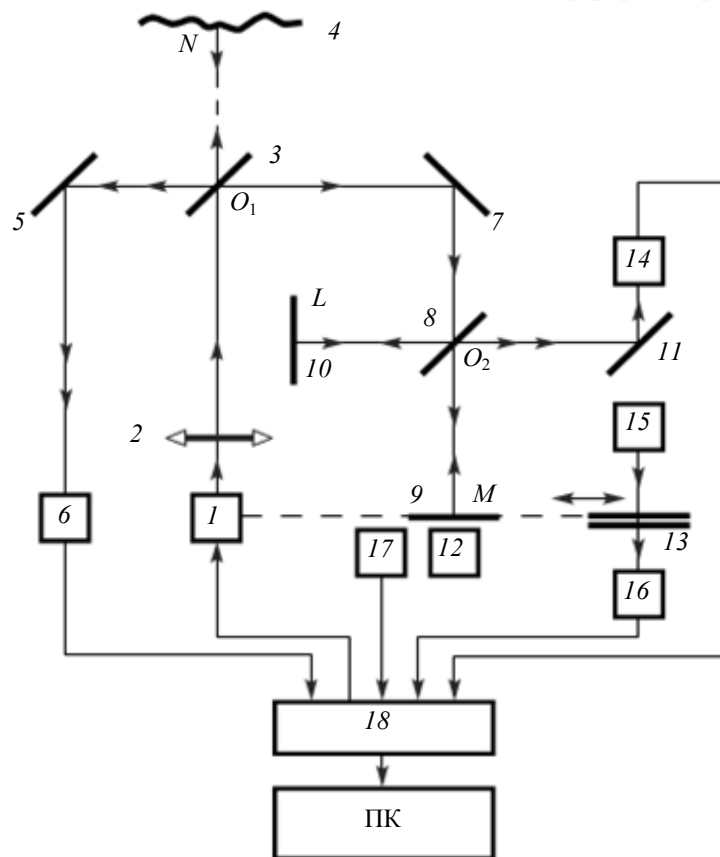


Рис. 1

Важными метрологическими характеристиками ОМГ являются диапазон измерений при контроле формы поверхности, амплитуда выходного сигнала при модуляции оптической разности хода и погрешность измерений системы.

Диапазон измерений. Диапазон измерения (Δz) при контроле формы поверхности диффузно-отражающих объектов с использованием ОМГ определяется диапазоном компенсационного изменения разности хода интерферирующих пучков [2]. Посредством этого изменения обеспечивается достаточная для анализа величина интерференционного сигнала. В этой связи для определения диапазона Δz производилось исследование амплитуды выходного сигнала (U/U_{\max}) при изменении расстояния (z) от оптической измерительной головки до поверхности объекта, в качестве которого использовалась плоскопараллельная стеклянная пластина. Исходным при проведении эксперимента считалось расстояние $z = 120$ мм, соответствующее максимальной амплитуде выходного сигнала при отсутствии возбуждающего напряжения на модуляторе положения опорного зеркала. Расчет зависимости амплитуды выходного сигнала от расстояния z производился при смещении контролируемой поверхности объекта вдоль направления зондирования в обе стороны от исходной точки. Результаты измерений при частоте сканирования опорного зеркала $f_M = 23$ Гц и $z = 120$ мм представлены на рис. 2, а.

Как следует из полученной зависимости, для используемой конструкции модулятора $\Delta z \approx 3,8$ мм. Схема модулятора показана на рис. 2, б, где 1 — пружины, 2 — опорное зеркало, 3 — постоянный магнит, стрелкой обозначено направление движения.

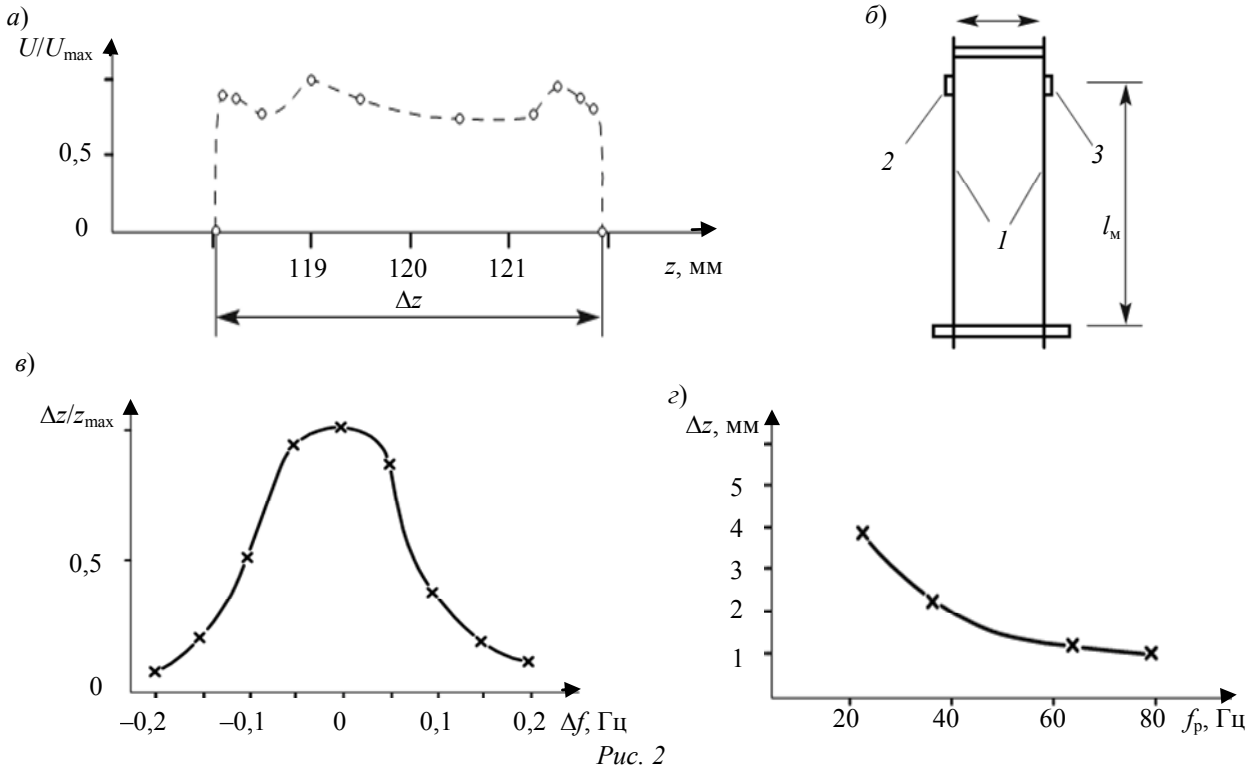


Рис. 2

Модулятор изготовлен на основе пружинного параллелограммного механизма и электромагнита. Возбуждение модулятора производится переменным током с частотой модуляции f_M , сканирование — на резонансной частоте механизма f_p : $f_M = f_p$. Оптимальное соотношение длины l_M пружинных сторон параллелограмма, частоты модуляции и амплитуды колебаний подбиралось экспериментальным путем. Повышение частоты модуляции f_M , с одной стороны, увеличивает частоту измерений, с другой — уменьшает амплитуду колебаний. При увеличении длины l_M увеличивается амплитуда колебаний, но уменьшается резонансная частота параллелограммного механизма (рис. 2, в).

Следует отметить, что пружинная колебательная система является высокодобротной: отклонение частоты f_M на 1 % от резонансной частоты f_p приводит к уменьшению амплитуды колебаний в 2 раза (см. рис. 2, в). На рис. 2, г показана зависимость диапазона измерений от резонансной частоты, изменение которой производилось за счет изменения длины пружин l_M .

Для каждого значения f_p определялась зависимость, аналогичная представленной на рис. 2, *a*, по которой вычислялся диапазон измерений. Полученная зависимость диапазона измерений от частоты сканирования опорного зеркала позволяет для каждой конкретной задачи выбрать оптимальное соотношение этих параметров.

Амплитуда информационного сигнала. Амплитуда сигнала совместно с огибающей интерференционного сигнала являются важнейшими характеристиками измерительного устройства, которые содержат информацию об измеряемом расстоянии, обеспечивают необходимую величину превышения полезного сигнала над уровнем шумов и помехозащищенность измерений [3]. Получение информации об изменении амплитуды выходного сигнала при изменении оптической разности хода позволяет визуализировать влияние спекл-модуляции на точность измерений. Исследование изменения амплитуды сигнала при сканировании контролируемой поверхности объекта дает возможность объяснить механизм формирования огибающей интерференционного сигнала при декорреляции спекл-полей.

В работе не ставилась задача изучения возможности влияния шероховатости поверхности на характеристики измерительной системы. Поэтому измерения проводились с использованием одного объекта с аттестованной поверхностью — плоскопараллельной стеклянной пластины, шлифованная поверхность которой относится к шестому классу шероховатости ($R_a = 2,0 \dots 2,5$ мкм).

Пластина крепилась на подвижной части микрометрического столика. Измерения проводились для различных значений диаметра (d) зондирующего пятна. Диаметр изменялся посредством введения между оптическим щупом и поверхностью плоскопараллельной пластины дополнительных стеклянных пластин различной толщины: 1,25, 2,5 и 3,5 мм, что соответствовало диаметру зондирующего пятна 50, 70 и 90 мкм. Результаты измерений показаны на рис. 3, *b—z*; на рис. 3, *a* представлен график зависимости $U/U_{\max}(x)$ для контролируемой пластины с шероховатостью $R_a = 2,0 \dots 2,5$ мкм и $d = 30$ мкм. Результаты расчета зависимости среднего значения амплитуды сигнала от размера зондирующего пятна показаны на рис. 3, *d*, где \bar{U}_{30} — амплитуда сигнала при $d = 30$ мкм.

Из приведенных зависимостей следует, что амплитуда сигнала может изменяться более чем на порядок. Это объясняет наличие сильно деформированных участков огибающей вследствие декорреляции спекл-полей. Действительно, при изменении разности хода лучей суперпозиция некоррелированных составляющих спекл-поля, имеющих различные амплитуды, приводит к дополнительной модуляции амплитуды интерференционного сигнала и, как следствие, к деформации огибающей. Результаты исследования формы огибающей при различных углах падения зондирующего излучения (θ) представлены на рис. 4. Как следует из графиков, при увеличении угла θ форма огибающей интерференционного сигнала изменяется.

Погрешность измерений. В процессе экспериментальных исследований регистрировались результаты измерений расстояния z при перемещении объекта относительно зондирующего пятна при различных значениях угла θ . Положение контролируемой поверхности относительно зондирующего луча фиксировалось под углом θ , равным 0, 30, 45, 60 и 72°. Таким образом, номинальное исходное расстояние ($z = 120$ мкм) оставалось неизменным, и регистрировались флуктуации результатов измерений этого расстояния (СКО δ_z), обусловленные спекл-модуляцией огибающей выходного сигнала. Перемещение объекта, закрепленного на микрометрическом столике, относительно щупа осуществлялось с шагом 50 мкм. Для каждого угла θ производилось 10 измерений.

В ходе эксперимента осуществлялся независимый контроль возможного отклонения направления перемещения столика (объекта) от плоскопараллельного. Для этого был собран дополнительный интерферометр Майкельсона, одно из зеркал которого крепилось на столике параллельно направлению перемещения. В качестве источника излучения использовался He—Ne-лазер с длиной волны $\lambda = 0,6328$ мкм. Контроль осуществлялся по классической

методике: смещение интерференционной картины на одну полосу соответствовало отклонению от плоскости на величину $\lambda/2 \approx 0,3$ мкм [4].

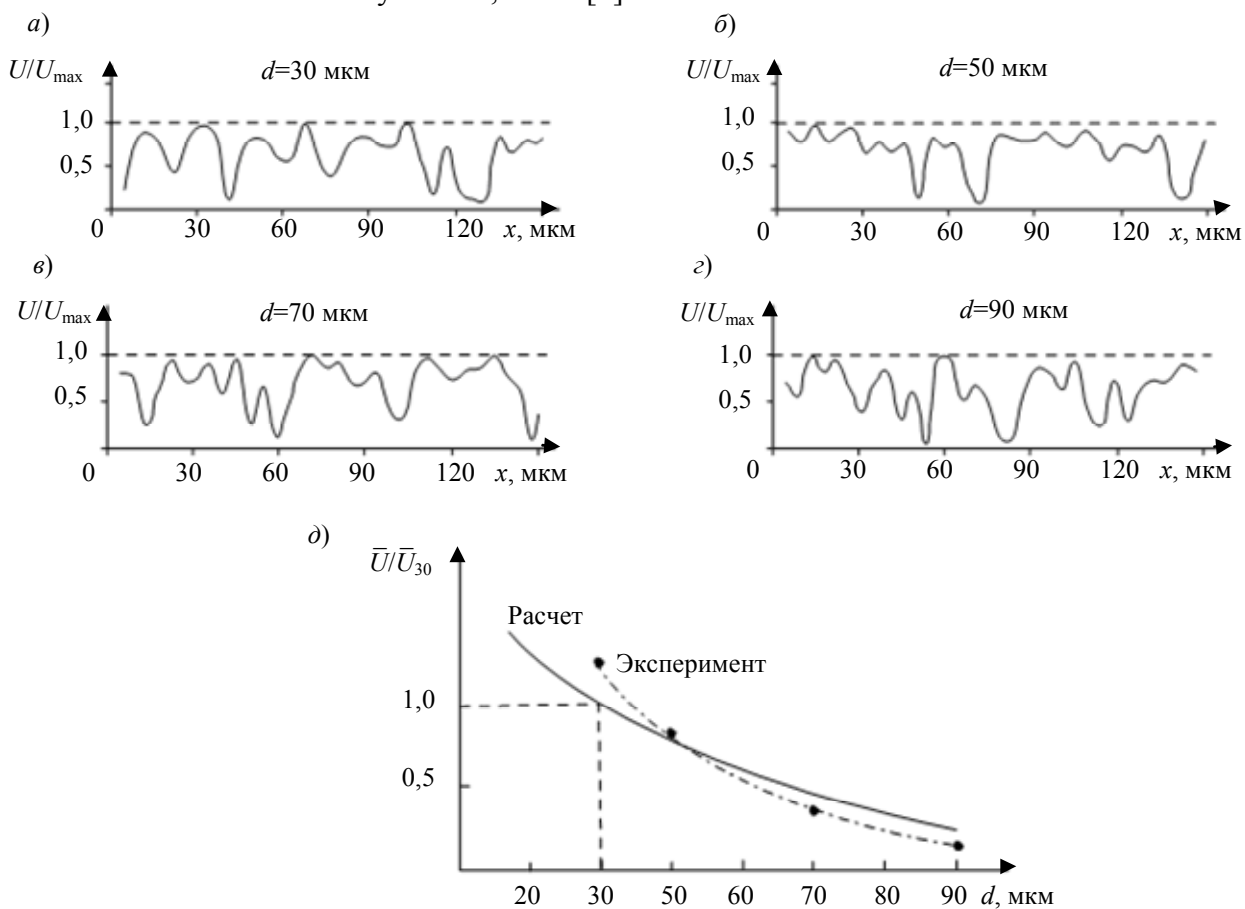


Рис. 3

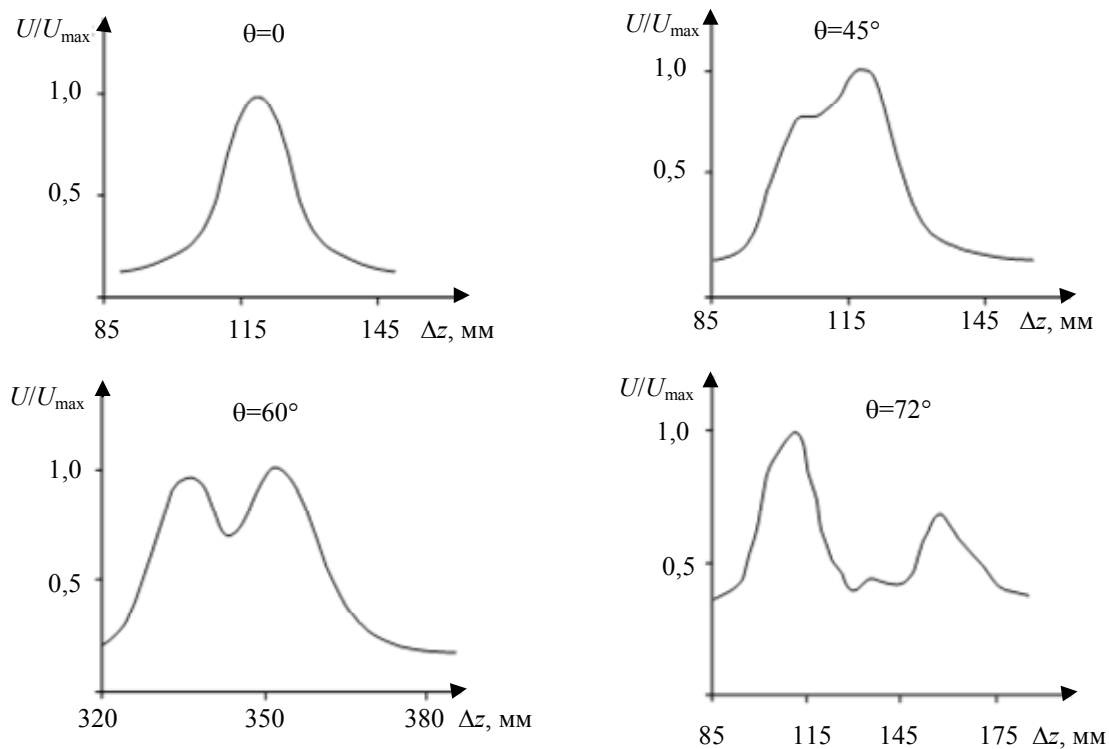


Рис. 4

Результаты измерений при обработке сигнала методом дифференцирования огибающей показаны на рис. 5, а при обработке методом площадей [4] — на рис. 6.

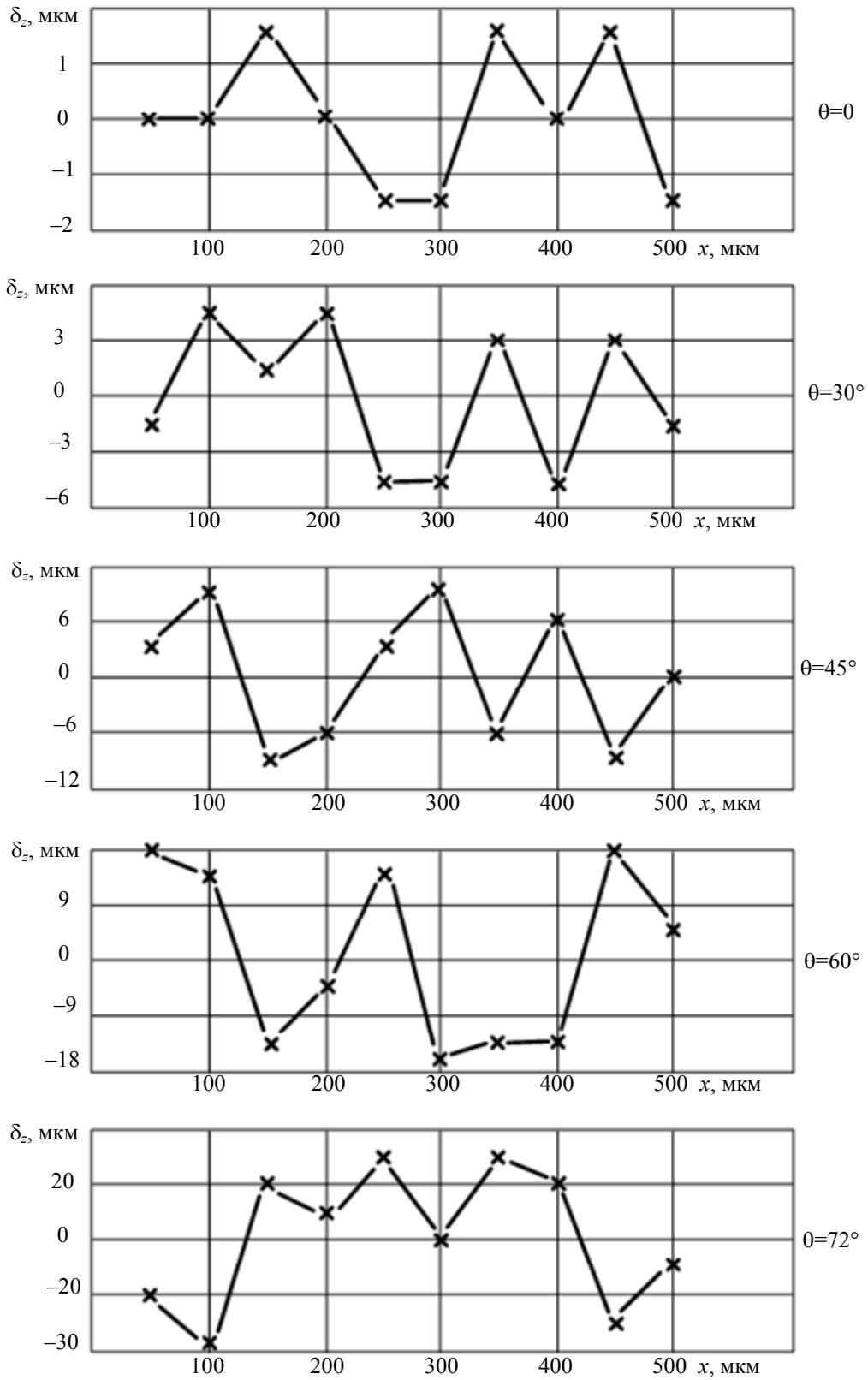


Рис. 5

В ходе исследований проводился также сравнительный анализ результатов экспериментальных измерений расстояния z с независимыми измерениями (Δz_a), выполненными с помощью аттестованного прибора — индикатора линейных перемещений 1МИГ (ГОСТ 9696-75) с погрешностью отсчета показаний 0,5 мкм. Результаты измерений представлены на рис. 7.

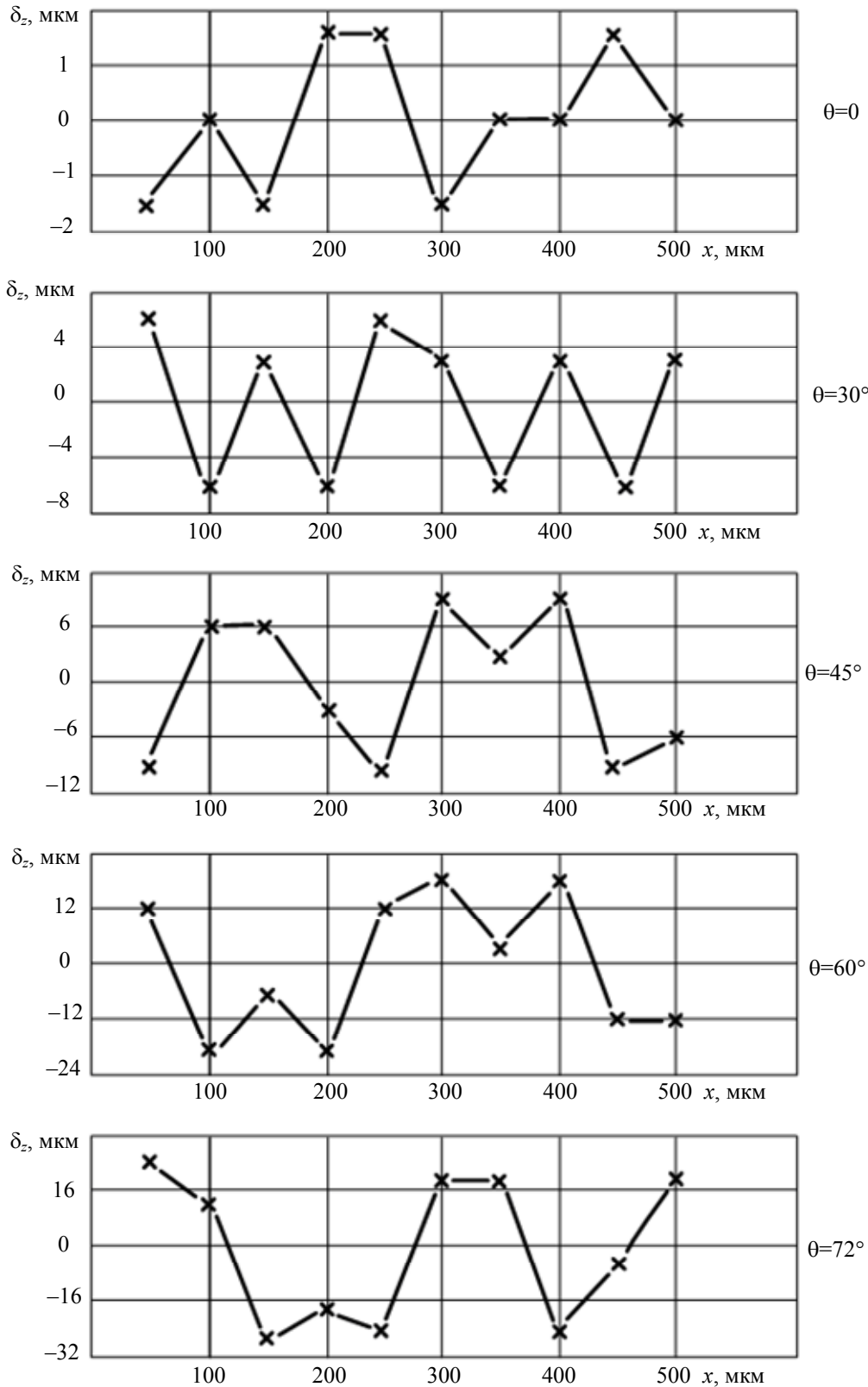


Рис. 6

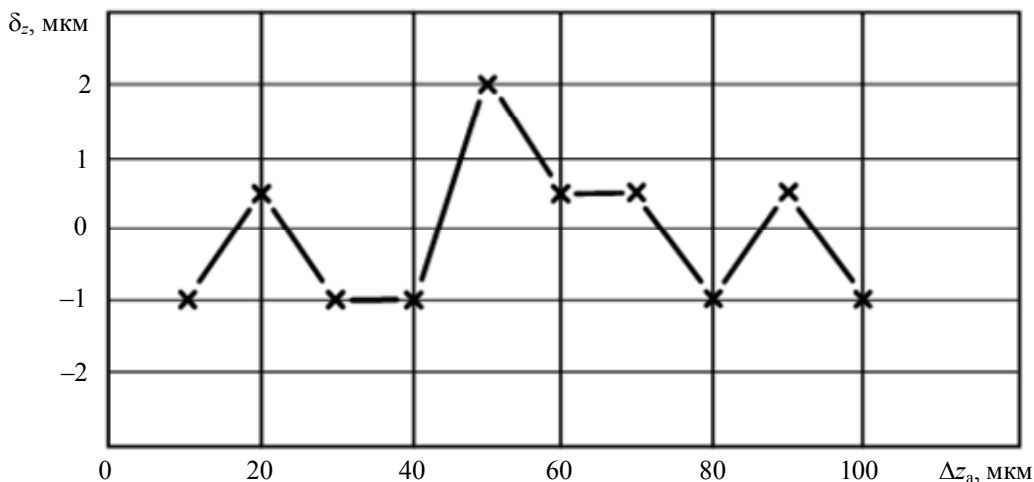


Рис. 7

Приведенные результаты экспериментальных исследований хорошо согласуются с теоретическими расчетами.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Pat. 6195168 USA. Infrared Scanning Interferometry Apparatus and Method / De Lega et al. 2001.
2. Большаков О. П., Котов И. Р., Хопов В. В. Система для измерения рельефа поверхности и упругости кожи // Мед. техника. 1997. № 5. С. 35—38.
3. Анисимов Н. М., Вязанкина М. К., Машек А. Ч., Майоров Е. Е., Чистякова Н. Я., Федоров А. Л. Лазерная спекл-техника // Сб. тр. Первой междунар. науч.-практ. конф. „Высокие технологии, фундаментальные и прикладные исследования в физиологии и медицине“. СПб: СПбГПУ, 2010. С. 148—152.
4. Майоров Е. Е., Крюкова Т. В., Смирнова Т. А., Чистякова Н. Я. Использование оптических приборов и методов в исследовании биологических объектов // Сб. статей Второй междунар. науч.-практ. конф. „Высокие технологии, фундаментальные и прикладные исследования в физиологии, фармакологии и медицине“. СПб: СПбГПУ, 2011. С. 94—96.

Сведения об авторах

- Евгений Евгеньевич Майоров** — канд. техн. наук, доцент; Северо-Западный государственный медицинский университет им. И. И. Мечникова, кафедра медицинской информатики и физики, Санкт-Петербург; E-mail: mayorov_ee@mail.ru
- Александр Чеславович Машек** — Военная академия связи им. С. М. Буденного, кафедра физики и математики, Санкт-Петербург; старший преподаватель; E-mail: galusinka@mail.ru
- Виктор Трофимович Прокопенко** — д-р техн. наук, профессор; Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, кафедра твердотельной оптоэлектроники; E-mail: prokopenko@mail.ifmo.ru
- Нина Ярославна Чистякова** — канд. физ.-мат. наук, доцент; Северо-Западный государственный медицинский университет им. И. И. Мечникова, кафедра медицинской информатики и физики, Санкт-Петербург; E-mail: medbiophys@rambler.ru

Рекомендована кафедрой
твердотельной оптоэлектроники
НИУ ИТМО

Поступила в редакцию
29.12.11 г.

ТЕПЛОВЫЕ РЕЖИМЫ И НАДЕЖНОСТЬ ПРИБОРОВ И СИСТЕМ

УДК 621.373.526

Ю. В. БАЁВА, А. В. ДЕМИН, С. И. ХАНКОВ, С. И. ЖУКОВ

МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕПЛОВОГО РЕЖИМА И ТЕРМОАБЕРРАЦИЙ МАЛОГАБАРИТНОГО КОСМИЧЕСКОГО ТЕЛЕСКОПА

Представлена методика расчета теплового режима и термонаведенных aberrаций оптико-электронной системы дистанционного зондирования Земли из космоса. Показано, что в пределах циклограммы функционирования приращения температур элементов телескопа и изменения термонаведенных aberrаций прямопропорциональны времени рабочего режима; при выбранной тепломеханической схеме обеспечивается термостабильность системы.

Ключевые слова: дистанционное зондирование Земли, оптико-электронные системы, микроспутник, тепловой режим, термоабберация.

Одно из перспективных направлений развития космических систем дистанционного зондирования земли (ДЗЗ) — разработка оптико-электронных систем (ОЭС) для микроспутников массой не более 100 кг. Такие ОЭС могут выводиться на орбиту как сопутствующие основному объекту на носителе, что снижает стоимость запуска и обслуживания. Наиболее рационально выводить на орбиту несколько ОЭС для микроспутников (МС), что позволяет посредством особого их расположения обеспечить большую зону обзора. Недостаточно высокое линейное разрешение ОЭС на местности может компенсироваться функционированием МС на более низких орбитах. Для обеспечения термостабильности подобных систем необходимо искать схемотехническое решение, позволяющее достичь требуемых параметров. Это объясняется тем, что создание системы автоматической фокусировки для подобных ОЭС экономически нецелесообразно ввиду малых массогабаритных характеристик и ограничений по энергетическим параметрам на МС.

Цель настоящей статьи — исследование теплового режима и термоаббераций объектива ОЭС ДЗЗ, базирующейся на МС в условиях открытого космоса, для определения возможности обеспечения ее термостабильности при следующих исходных данных: температура в местах крепления ОЭС к платформе МС — 0...35 °С; съемка при углах разворота МС относительно надира по углам крена и тангажа — до $\pm 30^\circ$; высотный угол Солнца при съемке — 5...90°; время непрерывной съемки — 10 мин; среднее значение высоты орбиты МС — 600 км; рабочий спектральный диапазон — 0,41...0,95 мкм.

Объект исследования. Общий вид ОЭС, построенной по схеме Ричи — Кретьена, приведен на рис. 1, где 1 — светозащитная крышка; 2 — объектив; 3 — система приема и преобразования информации. Основанием конструкции является титановая платформа, установленная на МС. К платформе крепятся линзовый корректор с главным зеркалом и

цилиндрический корпус, на противоположном конце которого на пилонах установлен стакан с вторичным зеркалом.

Нормальное положение плоскости наилучшего изображения (допустимое смещение ± 5 мкм) обеспечивается при температуре 20 ± 5 °С. Компенсация процесса выхолаживания ОЭС ниже заданных параметров обеспечивается за счет применения нагревателей, температура которых регулируется блоком управления по информации от термодатчиков. Нагреватели и термодатчики расположены внутри корпуса объектива и на платформе МС.

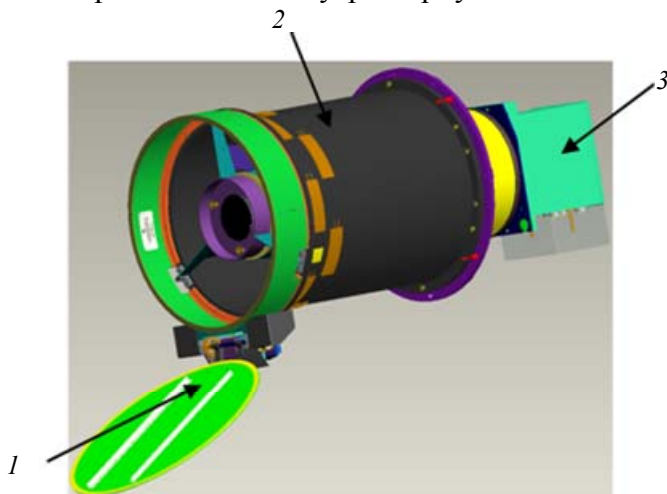


Рис. 1

Тепловая и математическая модели. Конструктивная модель объектива ОЭС приведена на рис. 2, где 1 — главное зеркало; 2 — вторичное зеркало (поверхности зеркал 1 и 2 — гиперболоиды вращения); 3 — корпус объектива; 4 — платформа МС, на которую крепится ОЭС; 5 — экранно-вакуумная теплоизоляция (ЭВТИ).

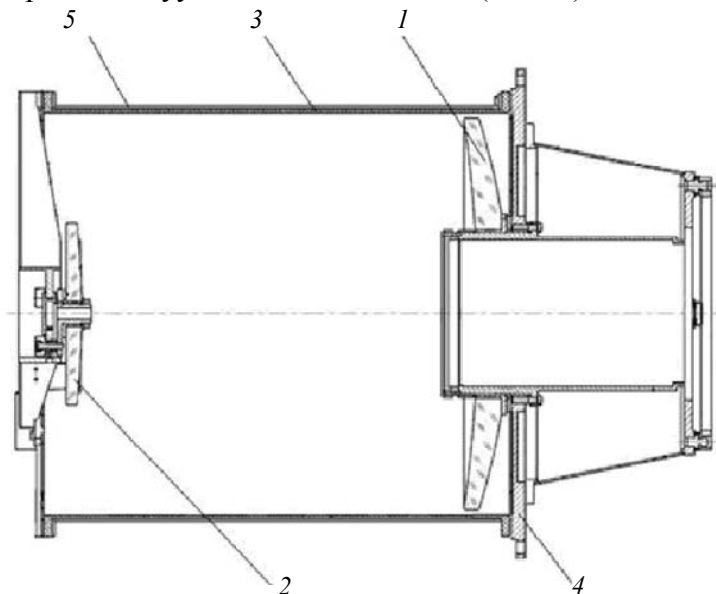


Рис. 2

Построение тепловой модели объектива ОЭС начинается с выделения основных элементов и определения тепловых связей между ними. Как видно из представленной конструкции объектива и соответствующего расчета оптической схемы, наиболее критичный параметр — это расстояние между главным и вторичным зеркалами. Первой ступенью реализации требуемого температурного режима является наличие экранно-вакуумной теплоизоляции, однако она не обеспечивает в полном объеме термостабильность, так как выполняет функцию экрана только для корпуса ОЭС. И поскольку теплоемкость ЭВТИ мала по сравнению

с теплоемкостью элементов объектива, ее влияние на тепловой режим можно не учитывать. Сама по себе система является совокупностью элементов с разными теплоемкостями, и элементы, теплоемкость которых ниже аналогичных параметров оптических элементов, в частности зеркал, не являются основными при составлении тепловой модели. Следовательно, для полноты тепловой модели эти элементы могут рассматриваться как тепловые мосты с заданными проводимостями. Таким образом, тепловая модель объектива сводится к системе пяти связанных между собой элементов: главного зеркала, вторичного зеркала, корпуса объектива, платформы МС, ЭВТИ.

Для построения тепловой модели телескопа примем следующие допущения:

- 1) все компоненты объектива изотермичны;
- 2) внешние тепловые потоки, воздействующие на объектив, — это собственный тепловой поток Земли, прямое и отраженное Землей солнечное излучение (методика их учета изложена в работах [1, 2]);
- 3) влияние МС на объектив в местах крепления задается граничным условием первого рода (задана температура);
- 4) электрические нагреватели равномерно распределены на платформе МС и корпусе объектива, при этом от мощности нагревателей зависит начальная температура всех элементов объектива; в период съемки нагреватели отключаются;
- 5) теплообмен излучением между зеркалами не учитывается вследствие малых значений степеней черноты их отражающих поверхностей.

При расчете теплового баланса каждого элемента учитываются тепловые потоки между ним и остальными элементами, его собственное излучение в окружающую среду, тепловыделение на поверхности элемента под воздействием внешних лучистых потоков и нагревателей. Математическая модель объектива представляет собой систему дифференциальных уравнений первого порядка, описывающих теплообмен между элементами конструкции ОЭС и внешней средой. В результате получаем систему уравнений для каждого из пяти элементов с разной проводимостью по i и j :

$$C_i \frac{dT_i}{d\tau} + \sum_{j=1}^n \sigma_{i-j} (T_i - T_j) + \varepsilon_i \varphi_{i-k} S_i \sigma T_i^4 = P_i, \quad (1)$$

где T_i и T_j — температура i -го и j -го элементов соответственно; σ_{i-j} — проводимость между элементами i и j ; C_i — полная теплоемкость i -го элемента; $\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8}$ Вт/м²·К⁴ — постоянная Стефана — Больцмана; φ_{i-k} — коэффициент облученности между i -м элементом и космосом [3]; ε_i и S_i — степень черноты и площадь поверхности i -го элемента соответственно; P_i — мощность тепловыделений в i -м элементе под воздействием внешних тепловых потоков; n — число элементов, состоящих в теплообмене с элементом i ; τ — время.

Полная проводимость σ_{i-j} определяется как сумма лучистой и кондуктивной проводимостей между элементами i и j :

$$\sigma_{i-j} = \sigma_{л\ i-j} + \sigma_{к\ i-j}.$$

Кондуктивная составляющая складывается из собственных проводимостей соединительных элементов, рассчитанных по известным формулам [4], и тепловых проводимостей контактов:

$$\sigma_{к\ i-j} = S_c \eta,$$

где S_c — площадь контакта элементов; η — контактный коэффициент теплообмена, в вакууме $\eta = 100$ Вт/м²·К [1].

Для расчета лучистой составляющей проводимости между элементами телескопа используется формула [4]

$$\sigma_{li-j} = \varepsilon_{пр} \Phi_{i-j} S_i \sigma \frac{T_i^4 - T_j^4}{T_i - T_j},$$

где $\varepsilon_{пр}$ — приведенная степень черноты поверхностей элементов i и j ; Φ_{i-j} — коэффициенты облученности элемента i элементом j .

Мощность тепловыделений в каждом элементе определяется как

$$P_i = [\varphi_i \varepsilon_i Q + \alpha_S (\varphi_k + \Phi) E] S_i, \quad (2)$$

где $Q = 235 \text{ Вт/м}^2$ — удельная мощность теплового излучения Земли от верхней границы атмосферы в открытый космос; $E = 1366 \text{ Вт/м}^2$ — солнечная постоянная; φ_i — коэффициент облученности i -го элемента поверхностью Земли с учетом высоты орбиты, угла наклона рабочей поверхности i -го элемента к плоскости местного горизонта и затенения другими элементами; φ_k — комбинированный коэффициент облученности i -го элемента отраженным Землей солнечным излучением, являющийся функцией высоты орбиты, угла наклона и затенения; Φ — геометрический фактор, учитывающий угол падения солнечных лучей и затенение; α_S — коэффициент поглощения солнечного излучения поверхностью элемента.

Коэффициенты облученности внутри корпуса объектива вычисляются по известным формулам [3]. Для расчетов коэффициентов облученности φ_i и φ_k использовались методики, изложенные в работе [1].

На каждом шаге итерации численно решается система алгебраических уравнений (1) методом обратной матрицы. Нелинейные проводимости вычисляются по значениям температур, полученных на предыдущем шаге, по формулам

$$\sigma_i(T) = AT_{m-2} T_{m-1}^2,$$

где A — постоянная составляющая проводимости; T_{m-2} — значение температуры, полученное на итерации $m-2$; T_{m-1} — значение температуры, полученное на итерации $m-1$;

$$\sigma_i(T' - T'') = A \frac{(T'_{m-2})^2 - (T'_{m-1})^2 - (T''_{m-2})^2 - (T''_{m-1})^2}{T'_{m-1} - T''_{m-2}},$$

где T' и T'' — температуры элементов 1 и 2, находящиеся в теплообмене друг с другом.

В нестационарном режиме в качестве начальных условий для решения системы дифференциальных уравнений принимались температуры всех элементов, которые устанавливаются при закрытой светозащитной крышке и работе автономной системы терморегулирования. Эти температуры считаются одинаковыми и равными $20 \text{ }^\circ\text{C}$.

Величина смещения фокальной плоскости рассчитываются по формулам [2]

$$\Delta f = B_\Gamma \theta_\Gamma - B_K \theta_K + B_B \theta_B, \quad (3)$$

где θ_i — перегрев i -го элемента относительно начальной температуры; индексы означают: К — корпус, Г — главное зеркало, В — вторичное зеркало.

Коэффициенты B_i , м/К, определяются следующим образом:

$$B_\Gamma = \alpha_\Gamma \frac{R_\Gamma}{2} \left(\frac{1+e}{1-e} \right)^2; \quad B_K = \alpha_K L \left(\frac{1+e}{1-e} \right)^2; \quad B_B = \alpha_B 2a \left(\frac{1+e}{1-e} \right), \quad (4)$$

где R_Γ — параксиальный радиус приемного зеркала; L — расстояние между зеркалами; a — большая полуось гиперболы вторичного зеркала; e — эксцентриситет гиперболы; α_i — коэффициент линейного расширения i -го элемента.

Расчет. В конструкции ОЭС использовались зеркала из ситалла марки СО-115М, выполненный из углепластика корпус и платформа, изготовленная из титана марки ВТ1-О.

Исходные значения параметров элементов системы, использованные при расчете, приведены в табл. 1 (здесь M — масса элемента).

Таблица 1

Элемент	M , кг	C , Дж/К	ε	α_s
Главное зеркало	4,2	3167	0,5	0,01
Вторичное зеркало	0,7	528	0,5	0,01
Корпус	3,4	2720	0,9	0,3
Платформа	6,3	3352	0,9	0,3

В расчетах использовались также следующие значения параметров, входящих в соотношения (4): $R_\Gamma = 1,21$ м; $a = 0,11$ м, $L = 0,378$ м; $e = 2,763$; $\alpha_\Gamma = \alpha_B = 1,5 \cdot 10^{-7} \text{ K}^{-1}$; $\alpha_K = 10^{-6} \text{ K}^{-1}$; в результате значения коэффициентов в уравнении (3) следующие: $B_\Gamma = 0,413$ мкм/К; $B_K = 1,72$ мкм/К; $B_B = 0,07$ мкм/К.

В табл. 2—4 представлены вычисленные значения угловых коэффициентов (ζ) между элементами ОЭС; тепловых потоков (Ω), поглощенных элементами системы в зависимости от углов ее ориентации; тепловых проводимостей между конструктивными элементами телескопа.

Таблица 2

Элемент i	Угловой коэффициент ζ			
	Элемент j			
	Зрачок	Корпус	Главное зеркало	Вторичное зеркало
Зрачок		0,84	0,16	—
Корпус	0,16		0,19	0,04
Главное зеркало	0,13	0,83		0,04
Вторичное зеркало	—	0,81	0,14	

Таблица 3

Углы, определяющие ориентацию: $\psi, \gamma_s, \dots^\circ$	Тепловой поток Ω , Вт, поглощенный			
	корпусом	главным зеркалом	вторичным зеркалом	ЭВТИ
$\psi = 0, \gamma_s = 0$	43,2	0,2	11,2	64,8
$\psi = 30, \gamma_s = 45$	30,7	0,2	7,9	146,2
$\psi = 30, \gamma_s = 60$	25,7	0,2	6,7	143,8

Таблица 4

Элемент	Проводимость σ_{i-j} Вт/К					
	Корпус	Главное зеркало	Вторичное зеркало	Платформа	ЭВТИ	МС
Корпус		—	0,0178	0,181	0,0025	—
Главное зеркало	0,024		—	0,407	—	—
Вторичное зеркало	0,0021	—		—	—	—
Платформа	—	0,078	—		—	0,344
ЭВТИ	—	—	—	—		—

Примечание: В верхней правой части относительно диагонали приведены величины кондуктивных проводимостей, а ниже диагонали — значения лучистых тепловых проводимостей.

Для переходных режимов были рассмотрены два варианта расчета термоаббераций:

1) положение МС в надир, положение Солнца в зените, температура в местах крепления $T_{кр} = 308$ К;

2) положение оптической оси ОЭС относительно вертикали — 30° , высота Солнца — 60° над горизонтом, $T_{кр} = 273$ К.

В расчетах принималось, что в обоих вариантах положение ОЭС относительно Земли и Солнца остается неизменным и тепловые потоки, описываемые соотношением (2), в течение всего цикла съемки постоянны.

Главное зеркало имеет наибольшую тепловую инерционность, вследствие чего основное влияние на смещение фокальной плоскости (в начале съемки) оказывает термодетформация корпуса.

В ходе исследований было установлено, что температуры элементов, а также смещение фокальной плоскости за время съемки (до 600 с) могут быть описаны уравнениями

$$\theta_i = U_i \tau, \quad \Delta f = V \tau,$$

где U_i , V — коэффициенты, характеризующие соответственно скорости нагрева элементов и термонаведенного смещения фокальной плоскости; величина V определяется с помощью соотношения

$$V = B_{\Gamma} U_{\Gamma} - B_{\text{К}} U_{\text{К}} + B_{\text{В}} U_{\text{В}};$$

значения U_i , в том числе для главного зеркала (U_{Γ}), корпуса ($U_{\text{К}}$) и вторичного зеркала ($U_{\text{В}}$) приведены в табл. 5, там же представлены значения перегревов элементов ОЭС в конце рабочего цикла.

Таблица 5

Элемент	Вариант 1		Вариант 2	
	$U_i \cdot 10^3, \text{ К/с}$	$\theta_i, \text{ К}$	$U_i \cdot 10^3, \text{ К/с}$	$\theta_i, \text{ К}$
Корпус	3,69	2,21	-1,43	-0,86
Главное зеркало	0,086	0,052	-0,13	-0,08
Вторичное зеркало	3,23	1,94	-1,19	-0,71
Платформа	1,46	0,88	-1,86	-1,12

Анализ табл. 5 показывает, что коэффициенты U_i и V являются постоянными с погрешностью $\pm 1\%$ в пределах прямой пропорциональности зависимости рассматриваемой ОЭС.

Значения скорости и величины смещения фокальной плоскости к концу съемки составили:

- для варианта 1: $V = -5,8 \cdot 10^3$ мкм/с, $\Delta f = -3,5$ мкм;
- для варианта 2: $V = 2,3 \cdot 10^3$ мкм/с, $\Delta f = 1,4$ мкм.

Эти значения не превышают допустимых.

Выводы.

1. Величины изменений температуры элементов и положения фокальной плоскости для нестационарного теплового режима ОЭС во время съемки пропорциональны времени. Это объясняется тем, что на начальном временном участке нагрева и охлаждения скорость изменения температуры элемента определяется отношением значения результирующего теплового потока к полной теплоемкости элемента.

2. Из всех элементов ОЭС наиболее сильное влияние на смещение фокальной плоскости оказывает корпус системы. Для ослабления этого влияния следует применять углепластик.

3. В соответствии с проведенными исследованиями по созданию тепловой модели ОЭС удалось обеспечить в реальной системе в пределах 10 мин рабочего времени температурный режим 20 ± 5 °С, при котором не происходит смещение фокальной плоскости и ухудшение качества изображения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Абдусаматов Х. И., Лаповок Е. В., Ханков С. И. Методы обеспечения термостабильности космического телескопа — солнечного лимбографа. СПб: Изд-во Санкт-Петербург. техн. ун-та, 2008. 195 с.
2. Абдусаматов Х. И., Богдавленский А. И., Лаповок Е. В., Ханков С. И. Исследование термостабильности зеркального телескопа — солнечного лимбографа в режиме непрерывного наблюдения за Солнцем // Оптик. журн. 2009. Т. 76, № 5. С. 51—59.
3. Уонг Х. Основные формулы и данные по теплообмену для инженеров. Справочник: Пер. с англ. М.: Атомиздат, 1979. 216 с.

4. Дульнев Г. Н., Семяшкин Э. Н. Теплообмен в радиоэлектронных аппаратах. Л.: Энергия, 1968. 360 с.

Сведения об авторах

- Юлия Валерьевна Баёва** — аспирант; Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, кафедра компьютерной теплофизики и энергофизического мониторинга; E-mail: yul.bayo@yandex.ru
- Анатолий Владимирович Демин** — д-р техн. наук, профессор; Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, кафедра информатики и прикладной математики; E-mail: dav_60@mail.ru
- Сергей Иванович Ханков** — д-р техн. наук; Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, кафедра компьютерной теплофизики и энергофизического мониторинга
- Сергей Ильич Жуков** — АО „ЛОМО“, Санкт-Петербург; главный специалист

Рекомендована кафедрой
компьютерной теплофизики и
энергофизического мониторинга НИУ ИТМО

Поступила в редакцию
01.09.11 г.

Е. И. Яблочников, В. А. Брагинский, А. С. Восоркин

ПРИМЕНЕНИЕ СИСТЕМ ВИРТУАЛЬНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ПРИ ВЫБОРЕ И ПРОЕКТИРОВАНИИ ПОЛИМЕРНЫХ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ

Рассмотрены особенности выбора композиционного материала как ключевой задачи при проектировании изделий из полимеров. Описано применение системы моделирования процессов литья под давлением Moldex3D. Приведена последовательность этапов выбора и проектирования материала с использованием систем виртуального моделирования и инженерного анализа.

Ключевые слова: полимерный композиционный материал, литье под давлением, системы виртуального моделирования и инженерного анализа.

Выбор материала является ключевой задачей при проектировании новых изделий из полимеров. В принятии решений участвуют различные специалисты (представители заказчика, дизайнеры, конструкторы и технологи, специалисты по материалам, метрологи), образующие экспертную группу, которая отвечает за окончательное решение.

Методика выбора полимерного композиционного материала (ПКМ) определяется содержанием задания, в котором приводится необходимая информация в виде „опросного листа“, отражающего условия эксплуатации изделия. Проектировщик изделия должен точно указать необходимый уровень требуемых механических, термических, химических свойств, установить приоритетность требований с учетом их значимости и учесть дополнительные функциональные требования: например, ультрафиолетовое облучение, радиационное воздействие, эксплуатационные ограничения (параметры долговечности, ползучести и др.). Следует также принимать во внимание необходимые требования по выбору технологии переработки материала и сборки конструкций, в которые входит проектируемая деталь. Многие полимеры плохо противостоят действию различных химических веществ. Поэтому требуется также учесть возможность их воздействия на создаваемое изделие [1]. Качество формирования исходных документов определяет в дальнейшем эффективность всех процессов, связанных с жизненным циклом изделия (проектирование — производство — эксплуатация).

Как правило, для любого изделия (тем более, сложного и ответственного назначения) необходимо обеспечить достижение требуемых параметров не по одному, а по нескольким эксплуатационным свойствам, степень влияния которых на выбор материала различна. В этом случае выделяют основные эксплуатационные свойства, по которым производят первичный поиск и оценивают пригодность материала, далее решения уточняются с учетом дополнительных свойств, не вошедших в список основных (иногда при этом оказывается целесообразным определенное снижение требований).

На практике применяется большое количество баз данных по полимерным материалам, которые содержат: описание свойств материала, полученных производителями и испытательными

лабораториями в соответствии со стандартами ISO и ASTM; данные о производителях; области применения материалов (например, базы данных CAMPUS (www.campus.com), M-Base (www.m-base.com), IDES (www.ides.com), Matweb (www.matweb.com) и др.).

Однако зачастую в результате поиска с использованием баз данных, справочной информации, данных от производителей материалов не удается найти материал, удовлетворяющий предъявляемым требованиям. В таких случаях проблема решается созданием новых композиций, а именно, производится направленное регулирование свойств ПКМ посредством модификации полимерной матрицы и подбора наполнителя. Модификация полимерной матрицы осуществляется путем введения других полимеров, пластификаторов и смазок, стабилизаторов, добавок. Подбор наполнителя предполагает вариацию его типа, формы и соотношения (объемного или массового, в процентах) к полимерной матрице, а также возможную технологию введения в композицию.

При проектировании новых ПКМ необходимо принимать во внимание сложность и разнообразие процессов, происходящих на разных стадиях формообразования изделия; их интегральное влияние лежит в основе образования определенной структуры ПКМ и, следовательно, комплекса свойств любой новой композиционной полимерной системы. В этом случае проблема заключается в возможности быстрого оценивания свойств спроектированного материала, проверке возможности применения соответствующих технологических методов, анализе требований, предъявляемых к изделию. Данный комплекс задач может быть решен с использованием методов и технологий компьютерного моделирования [2].

На рис. 1 (модификация рисунка, приведенного в работе [3]) представлены этапы выбора и проектирования ПКМ, используемых при изготовлении изделий литьем под давлением.



Рис. 1

Литье под давлением — широко применяемый процесс изготовления изделий из ПКМ, армированных короткими волокнами. Эти материалы получают все большее распространение, заменяя традиционные неармированные полимеры и составляя конкуренцию композиционным материалам с непрерывными волокнами. Основными входными данными для использования программного обеспечения, моделирующего литье под давлением (в статье рассматривается система Moldex3D [2]), являются:

— сведения о количестве волокон (объемная или массовая часть, в процентах);

- соотношение геометрических размеров волокна (отношение длины к диаметру); средний диаметр и длина коротких волокон;
- термомеханические свойства волокна: например, удельная теплоемкость, теплопроводность, коэффициент теплового расширения, упругие свойства;
- реологические и термомеханические свойства: например, вязкость, сжимаемость, теплоемкость и теплопроводность;
- температура и давление при литье;
- расположение впускных литниковых каналов и конфигурация формообразующей полости.

В результате моделирования формируется картина поведения материала на этапах процесса литья под давлением на термопластавтомате (заполнение литьевой формы, выдержка под давлением, охлаждение) в виде диаграмм, наглядно представляющих распределение температур, давлений, реологических параметров, движение потока расплава, коробления, усадки и т.д.

В первую очередь оценивается характер и полнота заполняемости формы, что во многом зависит от реологических свойств материала. Если при этом оказывается, что невозможно изготовить изделие из данного материала, то принимается решение о доработке литьевой формы, изменении технологических режимов или даже конструкции изделия. Для сложных изделий, работающих под нагрузкой, большое значение имеют зоны спая, возникающие при встрече потоков расплава (рис. 2).



Рис. 2

Зоны спая „ослабляют“ конструкцию изделия. Следует обращать внимание на равномерность распределения давления и температуры в формующей полости на различных этапах процесса литья. Равномерность распределения давления расплава в отливке обеспечивает лучшее уплотнение материала, что, в свою очередь, обеспечивает более высокую геометрическую точность изделия, отсутствие воздушных включений и пустот, его прочность. Управление температурой расплава при заполнении формы позволяет достичь равномерности его течения, отсутствия термодеструкции материала, возникающей при слишком высоких температурах. Также становится возможным предсказать появление некоторых дефектов, вызываемых различными температурными колебаниями. Детально проводится анализ равномерности

охлаждения изделия, поскольку на основе картины распределения температуры на этапе выдержки с охлаждением делается вывод о возникновении остаточных напряжений, влияющих на механические свойства изделия и приводящих к усадочным деформациям [4]. Кроме того, деформации могут быть вызваны и неравномерной ориентацией волокон. На рис. 3 представлены результаты расчета усадочных деформаций и указано отклонение (Δd , мм) отливки от исходной модели изделия. На основе оценивания этих параметров из списка конкурентных материалов выбирается предпочтительный с точки зрения технологичности переработки и обеспечения точности и качества изделия. (Расчет проведен для материала PA66 CF35 марки RADILON® A CF350. Данный материал представляет собой композицию полиамида ПА66 (PA66), наполненного углеродным волокном (CF — carbon fiber); содержание волокна составляет 35 %.)

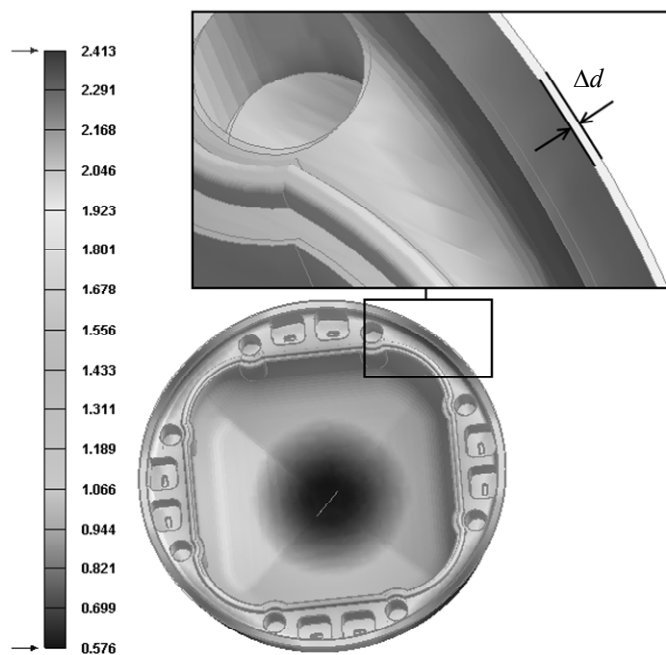


Рис. 3

Для достижения соответствия свойств выбранного материала заданным характеристикам изделия ориентация волокон имеет важнейшее значение, так как в процессе изготовления изделия именно ориентация волокон приводит к анизотропии свойств изделия. Картина распределения волокон в изделии после литья под давлением позволяет сделать вывод о предпочтительных для данного изделия направлениях и участках приложения нагрузки. В случае обратной задачи (когда известны места приложения и параметры нагрузки) это позволяет так подобрать литниковую систему, чтобы наилучшим образом обеспечить необходимые прочностные характеристики. На рис. 4 представлена картина ориентации волокон в изделии после заполнения полости литьевой формы, рассчитанная в системе Moldex3D. Численные значения показывают вероятность ориентации волокон.

После моделирования технологического процесса изготовления изделия данные об ориентации волокон в виде тензора ориентации (см. рис. 1) передаются в одну из систем структурного анализа (MSC.Nastran/Patran, Ansys, Abaqus, Samcef или др.) [5]. На основе усовершенствованной (относительно традиционного способа задания свойств материала, когда свойства задаются для всей модели усредненными) расчетной модели проводится анализ поведения изделия в условиях, определяемых техническим заданием или техническими требованиями, такими как жесткость, долговечность, ударопрочность, вибростойкость и др. Возможно проведение мультидисциплинарных расчетов, при которых учитывается влияние различных факторов одновременно. По результатам инженерного анализа принимается решение

о соответствии свойств данного материала эксплуатационным требованиям. При этом возможен вариант, когда доработка изделия выполняется в несколько итераций в целях достижения требуемых характеристик. Если же добиться этих характеристик не удастся, то материал исключается из списка конкурирующих.

Таким образом, выбор в пользу того или иного материала следует делать на основе оценки технологичности его переработки и степени обеспечения требуемых эксплуатационных характеристик изделия, которые, в свою очередь, находятся в зависимости от технологического процесса изготовления.

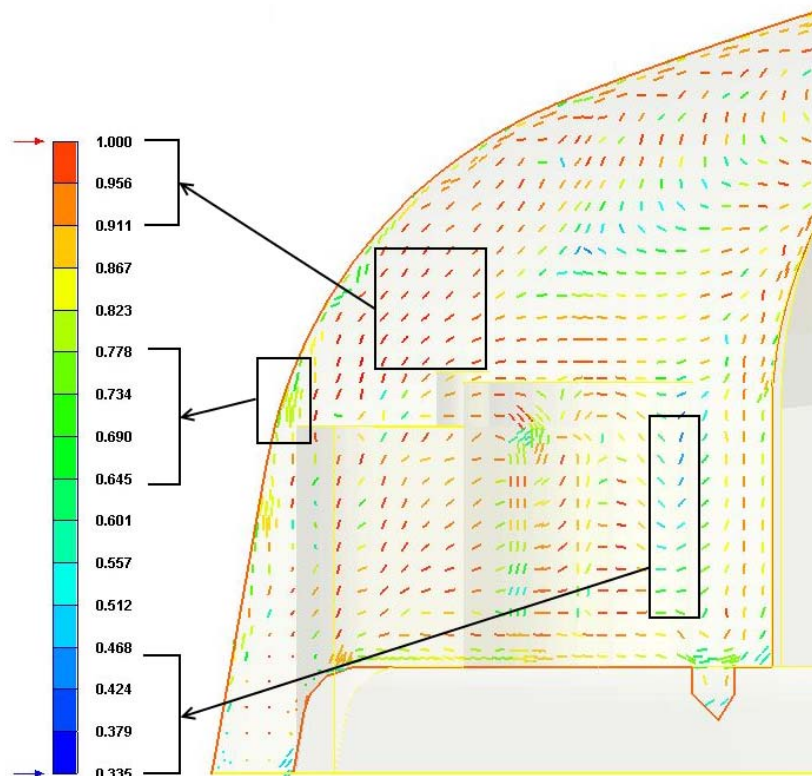


Рис. 4

Статья подготовлена по результатам исследований, проводимых в области информационно-телекоммуникационных систем для решения задач технологической платформы „Новые полимерные композиционные материалы и технологии“ по заказу Министерства образования и науки Российской Федерации (государственный контракт № 07.514.12.4015 на выполнение научно-исследовательских работ от 06.10.2011).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Шах В. Справочное руководство по испытаниям пластмасс и анализу причин их разрушения / Пер. с англ.; Под ред. А. Я. Малкина. СПб: НОТ, 2009. 732 с.
2. Яблочников Е. И., Васильков С. Д., Фомина Ю. Н. Интегрированные технологии проектирования изделий из полимерных композиционных материалов // Науч.-техн. вестн. информационных технологий, механики и оптики. 2012. № 2. С. 109—113.
3. Maréchal E. SAMCEF/Digmat based numerical simulation of short fibers reinforced thermoplastics in aircraft engine applications // 12th SAMTECH Conf. Belgium, 2011. P. 2—23.
4. Освальд Т. А., Тунг Л.-Ш., Грэмман П. Дж. Литье пластмасс под давлением / Под ред. Э. Л. Калинин. СПб: Профессия, 2008. 712 с.
5. Peng A. Y., Yang W.-H., Hsu D. C. Enhanced structure CAE solution with molding effect for automotive parts // 63rd Society of Plastics Engineers ANTEC 2005. Boston, 2005. P. 2787—2791.

Сведения об авторах

- Евгений Иванович Яблочников** — канд. техн. наук, доцент; Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, кафедра технологии приборостроения; E-mail: eugeny@bee-pitron.spb.su
- Владимир Абрамович Брагинский** — канд. техн. наук, доцент; журнал „Металлообработка“, Санкт-Петербург; член редакционного совета; E-mail: ipspe@mail.ru
- Алексей Сергеевич Восоркин** — аспирант; Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, кафедра технологии приборостроения; E-mail: asvosorkin@gmail.com

Рекомендована кафедрой
технологии приборостроения НИУ ИТМО

Поступила в редакцию
23.02.12 г.

УДК 535.212

С. В. ГАГАРСКИЙ, В. С. ЕРМОЛАЕВ, А. Н. СЕРГЕЕВ, М. В. ПУЗЫК

ИССЛЕДОВАНИЕ ЛУЧЕВОЙ ПРОЧНОСТИ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПОКРЫТИЙ, НАНЕСЕННЫХ НА ОПТИЧЕСКУЮ ПОВЕРХНОСТЬ

Представлена методика определения порога оптического разрушения в объеме прозрачных диэлектриков и на поверхности элементов силовой лазерной оптики, позволяющая определять статистику оптического пробоя в режиме воздействия одиночным лазерным импульсом и в режиме накопления. Приведены результаты измерений порога оптического пробоя на элементах, поверхность которых обработана по предложенной технологии химико-механической полировки.

Ключевые слова: лучевая прочность, прозрачный диэлектрик, лазерно-индуцированный пробой, обработка поверхности.

Введение. Определение лучевой прочности оптических компонентов силовых лазерных установок, используемых в различных технологиях обработки материалов, дальнометрии, медицине, а также при научных исследованиях, — одна из актуальных задач развития лазерной техники. Выявление физических причин светового разрушения широкозонных диэлектриков и зависимости лучевой прочности различных оптических материалов от их структуры, а также таких параметров, как длина волны используемого излучения, длительность импульсов, размеры светового пучка, периодичность и полное время воздействия импульсного излучения, вызывает стабильный интерес в условиях постоянного роста требований к уровню удельной выходной мощности и ресурсу работы современных лазерных систем [1—6]. Помимо физической лучевой прочности материала, которая определяется энергетической структурой его уровней и химическим составом, существует и технологическая прочность, которая зависит от технологии изготовления (выращивания, варки и т.д.) объемного материала, обработки поверхностей и нанесения оптических покрытий. Для оптических элементов мощных лазерных систем одним из наиболее важных параметров является лучевая прочность поверхностей, на которые наносится металлическое или диэлектрическое покрытие. Оперативное определение зависимости долговременной лучевой прочности оптических поверхностей от технологических режимов их изготовления и используемых материалов представляется весьма актуальной задачей. В настоящей статье предложена экспресс-методика определения объемной лучевой прочности прозрачных диэлектриков, а также лучевой прочности оптических поверхностей и их покрытий с использованием килогерцовых лазерных излучателей.

Схема установки и методика измерений порога оптического разрушения материалов. Суть предлагаемой методики состоит в том, что лазерный импульс, после прохождения через зеркальную систему углового сканирования и телецентрическую фокусирующую систему, направляется на исследуемый объект, в объеме или на поверхности которого определяется порог оптического разрушения. Оптическая система совместно с системой Z-коррекции обеспечивают фокусировку излучения в одной плоскости в широком диапазоне углов падения на входе в фокусирующий объектив при минимальном изменении диаметра сфокусированного пучка в пределах поля сканирования. В процессе сканирования лазерный пучок формирует концентрические зоны фокусировки излучения, в каждую из которых направляется выбранное количество импульсов с определенной энергией. Энергия импульсов дискретно изменяется в радиальном направлении от зоны к зоне в соответствии с заданным шагом, причем направление этого изменения выбирается либо от центра к периферии поля сканирования, либо наоборот. Таким образом, устраняется погрешность, связанная с остаточными aberrациями, вносимыми оптической системой и возможными динамическими тепловыми процессами в лазерном источнике. Для исследования процессов накопления при оптическом пробое цикл сканирования может многократно повторяться посредством введения в каждую из точек фокусировки выбранного количества импульсов с заданным интервалом. За один цикл сканирования производится такое число выстрелов, которое обеспечивает необходимую точность измерений.

Схема установки, которая использовалась в ходе экспериментов, приведена на рис. 1. Импульс запуска 2 от платы управления, установленной в персональном компьютере 1, включает импульс накачки в блоке питания лазерного диодного модуля 3. Световая накачка передается в лазерный излучатель 5 по оптическому волокну 4 с диаметром сердцевины 600 мкм с числовой апертурой $Na=0,22$.

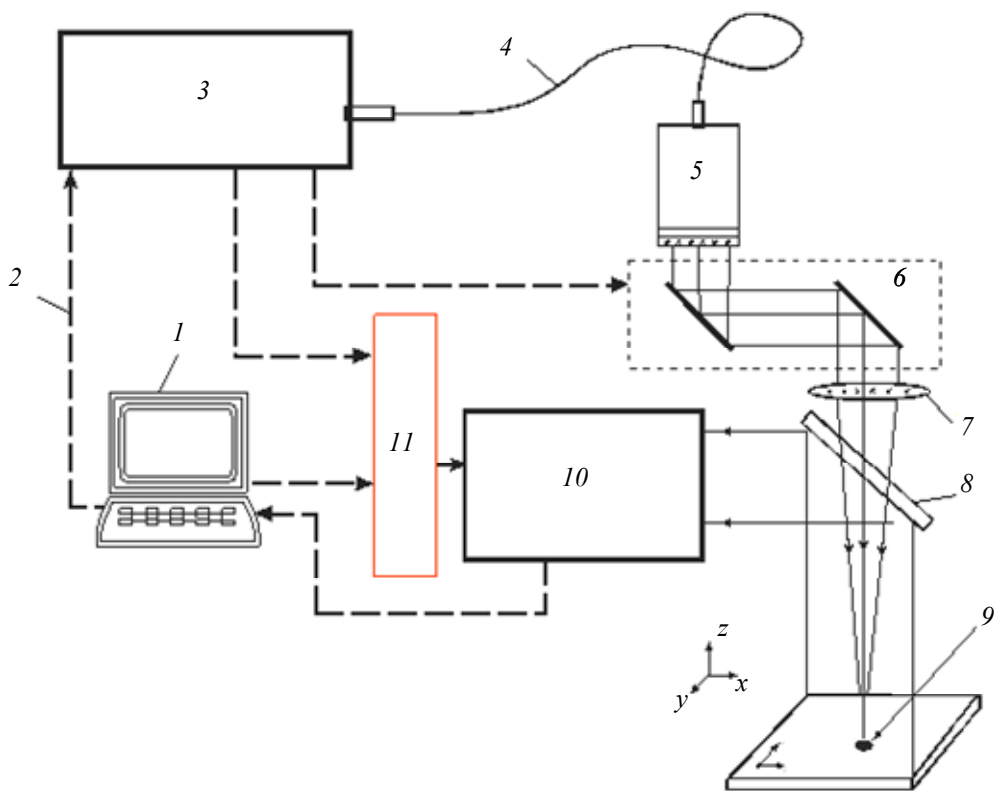


Рис. 2

В описанном далее цикле экспериментов в качестве излучателя использовался лазер на кристалле ванадата иттрия типа VLC-3 [7] с продольной диодной накачкой от модуля JOLD QPXF 50-2L, электрооптической модуляцией добротности и скоростным электронным

модулем управления энергией выходных импульсов. Частота повторения импульсов генерации достигала 2 кГц, длительность $\tau_{1/2} = 4,6$ нс, максимальная энергия импульсов на фундаментальной длине волны $\lambda = 1064$ нм превышала 2 мДж. Параметр качества поперечного распределения пучка (M^2) после преобразования его во вторую гармонику и прохода через всю оптическую схему составлял величину 1,35. Существенной особенностью излучателя типа VLC-3, снабженного блоком питания LDMPS 100 [8], является оригинальная система программного управления электрооптическим затвором, позволяющая изменять энергию в каждом из следующих с кГц частотой лазерных импульсов практически без изменения пространственно-временной структуры излучения. Используемые в измерениях импульсы близки к гауссовым по распределению как во времени, так и в пространстве. Нестабильность энергии от импульса к импульсу не превышала 2 %. Значение пиковой интенсивности по измеренному значению энергии E_0 импульса в этом случае определялось как

$$I_{\max} = 16\pi^{-3/2} (\ln 2)^{1/2} E_0 / \tau_{1/2} 2\omega,$$

где $\tau_{1/2}$ — длительность импульса по уровню 0,5; 2ω — полная ширина пучка по уровню e^{-2} .

Расширенный выходным телескопом пучок (см. рис. 1) после прохождения через систему углового сканирования 6 (HurrySCAN, SCANLAB AG) фокусируется на исследуемый объект 9 через спектроделитель 8 телецентрическим объективом 7 (PhotonicsDevices 532-120). Изображение исследуемого участка объекта считывается видеокамерой 10 с системой управления 11 и обрабатывается компьютером. Изначально записывается опорная картина расположения координат точек локализации лазерного разрушения на исследуемой поверхности при постоянном значении энергии входного импульса, заведомо превышающем порог оптического пробоя объекта (рис. 2, а). Эта картина необходима также для записи текущего состояния светового фона, записываемого камерой. Затем, после перемещения или смены образца, сканирование производится в соответствии с выбранным законом изменения энергии импульсов, направляемых к точкам в центре и на периферии исследуемого участка (рис. 2, б).

а)

б)

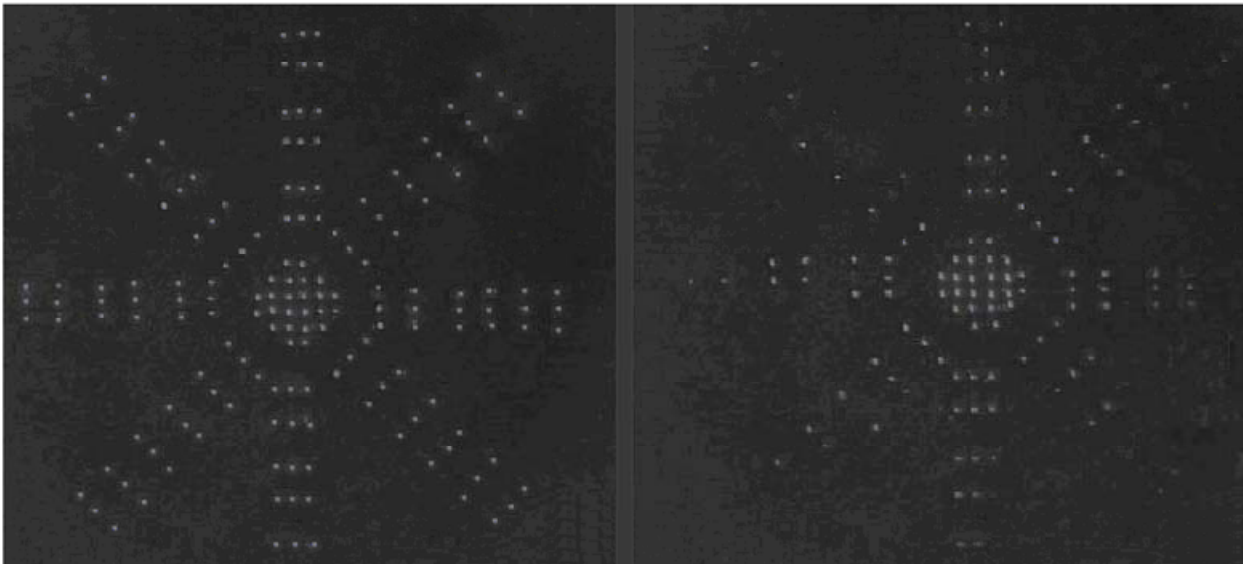


Рис. 2

В результате за один цикл сканирования, проводимый в течение 1 с (100—1000 выстрелов), определяется зависимость вероятности оптического разрушения исследуемого объекта от энергии входного импульса.

Эксперимент. По вышеизложенной методике было проведено сравнительное исследование лучевой прочности диэлектрических просветляющих покрытий $\text{SiO}_2\text{—Y}_2\text{O}_5\text{—SiO}_2$, нанесенных на образцы кварцевого стекла КУ1. Часть исследуемых образцов перед нанесением покрытия в вакуумной камере после проведения стандартной процедуры глубокой шлифовки-полировки подвергалась дополнительной химико-механической гидрообработке. Технология такой обработки, условно называемой финишной полировкой, была разработана совместно специалистами НИУ информационных технологий, механики и оптики и Российского государственного педагогического университета им. А. И. Герцена (оба — Санкт-Петербург) [9]. Эта технология базируется на реализации условий постоянного и равномерного взаимодействия направленного потока суспензии, содержащей абразивный материал, с поверхностью обрабатываемого изделия. Технология используется для обработки различных твердых материалов без ограничений на их геометрическую форму и размеры. При обработке не изменяются геометрические параметры изделий, изменяется только микрорельеф поверхности и устраняются посторонние микровключения. Для успешного проведения процесса обработки необходимо обеспечить соблюдение условий ламинарности потока рабочей суспензии, обладающей определенной вязкостью и химической активностью, а также поддержания заданного значения угла, при котором абразивные частицы сталкиваются с образующей обрабатываемой поверхности. Выбор используемых компонентов и режима обработки определяется твердостью материала изделия. В результате этой процедуры значительно уменьшаются шероховатость и концентрация остаточных микровключений на обработанной поверхности, частично сглаживаются микронеровности. Это, в свою очередь, приводит к уменьшению локальных коэффициентов диффузного отражения и поглощения оптической поверхности. Данная технология может применяться как самостоятельно (как завершающая фаза полировки), так и в сочетании с ионно-лучевыми и ионно-плазменными методами очистки поверхностей [10], в частности при подготовке изделия для нанесения диэлектрических или металлических покрытий.

После 6-часового цикла обработки значения шероховатости поверхности исследуемых образцов уменьшались относительно начального значения, соответствующего классу чистоты $R_z=0,05$ (для выбранных бездефектных участков), приблизительно в 3 раза (до $R_z=0,015$) при соответствующем уменьшении высоты максимумов микрорельефа от 8—12 нм до 2—3 нм. Измеренное значение коэффициента остаточного диффузного рассеяния при этом уменьшилось более чем в два раза.

В проведенном цикле измерений лучевой прочности диэлектрических покрытий диаметр лазерного пучка на длине волны 532 нм в плоскости фокусировки объектива составлял 29 мкм, погрешность позиционирования центра пучка не превышала 2 мкм. При осуществлении за 1 цикл сканирования порядка 100 выстрелов погрешность определения порога разрушения в выбранных объектах оценивалась как $\pm 10\%$. На рис. 3 приведен график зависимостей вероятности (P) появления лазерно-индуцированного пробоя просветляющего диэлектрического покрытия, нанесенного на поверхность плавленого кварца КУ1, от плотности энергии

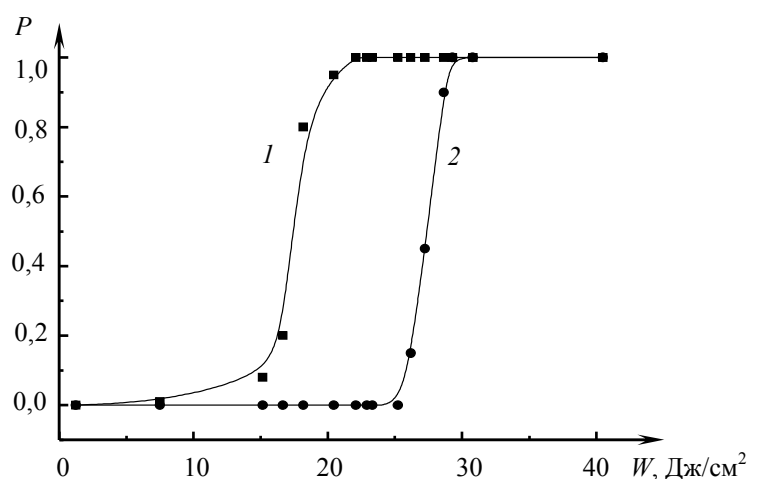


Рис. 3

появления лазерно-индуцированного пробоя просветляющего диэлектрического покрытия, нанесенного на поверхность плавленого кварца КУ1, от плотности энергии

падающего излучения (W): кривая 1 соответствует образцам с оптическими поверхностями, обработанными методом глубокой шлифовки-полировки в соответствии с ОСТ 3-6043-86; кривая 2 характерна для аналогичных образцов, но с поверхностями, подвергнутыми дополнительной процедуре финишной полировки. Нанесение диэлектрических покрытий проводилось в одном технологическом цикле.

Измеренные значения порога разрушения диэлектрического просветляющего покрытия, определяемые по уровню 50 %-ной вероятности появления разрушения в произвольной точке (см. рис. 3) поверхности, составили соответственно $17,5 +5/-10$ Дж/см² и $27,5 \pm 2,5$ Дж/см² для исходных образцов и образцов, прошедших дополнительную обработку.

Заключение. С использованием представленной в настоящей статье методики измерения лучевой прочности оптических материалов было проведено определение порогов лазерного разрушения диэлектрических покрытий, нанесенных на оптические подложки, поверхность которых была обработана по разработанной технологии химико-механической финишной полировки. В результате измерений установлено, что процедура финишной обработки наряду с увеличением значения лучевой прочности покрытия, усредненного по площади оптической поверхности, приводит также к существенному сокращению дисперсии измеренных значений порога разрушения в точках, расположенных в пределах площади обработанной поверхности.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Имас Я. А.* Оптический пробой прозрачных диэлектриков // Обзор экспериментальных работ. Минск: Ин-т тепло- и массообмена АН БССР, 1982. 60 с.
2. *Колодный Г. Я., Левчук Е. А., Подрядин Ю. Д., Яковлев П. П.* Многослойные интерференционные покрытия в квантовой электронике // Электронная промышленность. 1981. № 5—6. С. 93—101.
3. *Маненков А. А., Прохоров А. М.* Лазерное разрушение прозрачных тел // Успехи физ. наук. 1986. Т. 148, вып. 1. С. 5—38.
4. *Покотило И. Л.* Развитие теории лазерного разрушения прозрачных оптических материалов: Зависимость порога разрушения от длительности импульса и закономерности разрушения покрытий: Автореф. дис. ... канд. физ.-мат. наук. Долгопрудный, 1998.
5. *Дьюли У.* Лазерная технология и анализ материалов. М.: Мир, 1986. 504 с.
6. *Рэди Дж.* Действие мощного лазерного излучения. М.: Мир, 1974. 356 с.
7. *Гагарский С. В., Приходько К. В.* Мощный наносекундный эрбиевый лазер с диодной накачкой // Тез. докл. XXXVI науч.-техн. конф. профессорско-преподавательского состава СПбГИТМО(ТУ). СПб, 2007.
8. *Тогатов В. В., Гагарский С. В., Гнатюк П. А., Черевко Ю. И.* Импульсный блок питания лазерных диодных модулей для накачки твердотельных лазеров // Приборы и техника эксперимента. 2007. № 2. С. 158—159.
9. *Гагарский С. В., Ермолаев В. С., Иночкин М. В., Сергеев А. Н., Шимберев Б. В.* Лазерные оптические элементы: лучевая прочность, обработка поверхности // Тез. докл. XXXVII науч. и учеб.-метод. конф. СПбГУ ИТМО. СПб, 2008.
10. *Черезова Л. А.* Ионно-лучевые методы в оптической технологии. СПб: СПбГУ ИТМО, 2007. 151 с.

Сведения об авторах

- Сергей Валерьевич Гагарский** — канд. физ.-мат. наук; Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, кафедра лазерной техники и биомедицинской оптики; E-mail: s.gagarsky@mail.ru
- Владимир Сергеевич Ермолаев** — Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, кафедра лазерной техники и биомедицинской оптики; ст. науч. сотрудник

- Андрей Николаевич Сергеев* — аспирант; Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, кафедра фотоники и оптоинформатики; E-mail: mg_phoenix@yahoo.com
- Михаил Владимирович Пузык* — канд. хим. наук, доцент; Российский государственный педагогический университет им. А. И. Герцена, кафедра неорганической химии, Санкт-Петербург; E-mail: puzyk@mail.ru

Рекомендована кафедрой
лазерной техники и биомедицинской
оптики НИУ ИТМО

Поступила в редакцию
16.06.11 г.

УДК 543.42: 681.785

А. Л. ИТИН, С. Б. ЛУКИН, М. В. УСПЕНСКАЯ, В. С. СОЛОВЬЕВ

ИССЛЕДОВАНИЕ ОПТИЧЕСКИХ СВОЙСТВ АКРИЛОВОГО ГИДРОГЕЛЯ ДЛЯ СИСТЕМ ИНДИКАЦИИ ЗАГРЯЗНЕНИЙ

Приведены результаты исследований оптических свойств пленок акрилового гидрогеля, используемого в качестве чувствительного элемента в оптоэлектронных системах индикации загрязнений. Экспериментально получены спектральные характеристики и функции изменения показателей преломления пленок полимерного материала в результате его набухания в водных растворах поливалентных металлов разной концентрации при комнатной температуре.

Ключевые слова: акриловый гидрогель, спектральные характеристики, показатель преломления, загрязнители, набухание, сорбция.

Полимерные технологии находят широкое применение при изготовлении легко воспроизводимых и недорогих микросистем, используемых в сенсорных системах. Такие оптические сенсоры обеспечивают получение информации о химическом составе среды (раствора), с которой взаимодействует чувствительный элемент сенсора, и позволяют не только устанавливать связи между составом вещества и параметрами, характеризующими его свойства, но и использовать выявленные закономерности для разработки способов определения концентрации примесей без отбора анализируемой пробы.

Для химической индикации в оптических сенсорах в качестве селективного слоя могут использоваться полимерные материалы. В настоящее время существует ряд коммерчески доступных полимеров, имеющих достаточный диапазон изменения химических и физических характеристик, а также обладающих нетоксичностью, механической прочностью и оптической прозрачностью в выбранном диапазоне, что обуславливает возможность построения на их основе оптоэлектронных систем контроля состава веществ. Благодаря легкости, с которой оптические элементы могут быть смоделированы и обработаны [1], возможна их интеграция в таких системах.

При сравнении доступных полимеров, используемых в создании химических сенсоров, можно выделить гидрофильные материалы, которые обеспечивают в полимерной матрице свойства, сравнимые с водной средой [2]. В таких материалах частицы могут свободно диффундировать в объем всей полимерной матрицы, что позволяет создавать сенсор с повышенной чувствительностью.

К подобным материалам можно отнести акриловые гидрогели, которые имеют высокую степень влагоудержания и являются чувствительными даже к незначительным изменениям окружающей среды, т.е. ионному составу и водородному показателю среды. Именно поэтому материалы на основе сшитых акриловых сополимеров, способных поглощать различные

жидкости (воду, солевые растворы, кровь и пр.), находят широкое применение в разных отраслях промышленности и в таких областях, как медицина, сельское хозяйство, строительство и др. [3—6].

В настоящей статье представлены результаты исследований оптических свойств влагопоглощающих полимерных пленок акрилового гидрогеля, полученного радикальной полимеризацией натриевой соли акриловой кислоты и акриламида в водной среде при температуре процесса 40 °С в течение 2,5 ч. Соотношение мономеров составляло 70:30, доля сшивающего агента N, N'-метиленабисакриламида — 0,2 масс. % от общей массы мономеров.

Синтезированные полимеры были помещены в дистиллированную воду для удаления золь-фракции. Значение равновесной степени набухания полученных материалов определялось стандартным гравиметрическим методом [7].

Для исследования показателя преломления (n) пленок акрилового гидрогеля использовался рефрактометр Leica Abbe Mark II Plus с диапазоном измерения $n = 1,32...1,70$ и погрешностью $\pm 1 \cdot 10^{-4}$.

Были исследованы зависимости изменения показателя преломления акрилового полимера от концентрации (C) ионов хрома и кобальта, используемых в окружающем водном растворе в качестве загрязнителя. Образцы помещались на определенное время ($t < 10$ мин) в различные по концентрации ($C=0, 0,1, 0,001$ моль/л) водные растворы CoCl_2 и CrCl_3 для набухания и сорбции ионов металлов. При этом изменение показателей преломления пленок фиксировалось относительно показателей преломления исходных водных растворов хлоридов кобальта и хрома (III).

Экспериментальные результаты исследований изменения показателей преломления (а также их средних значений \bar{n}) полимерных акриловых пленок в процессе набухания в течение первых 10 мин при температуре окружающей среды 20 °С представлены на рис. 1, 2 и в табл. 1, 2.

Как показывает анализ представленной на рис. 1 зависимости $n(C)$, изменение значения n имеет следующий характер: диапазон изменения составляет от 1,410 — для ненабухшей акриловой пленки до 1,340—1,380 — для пленки в набухом состоянии, характеризуемом наличием сорбированных поливалентных ионов-загрязнителей. Это обстоятельство позволяет использовать исследуемый полимерный материал в качестве чувствительного элемента в системах индикации, основанных на измерении показателя преломления.

Динамические свойства потенциального чувствительного элемента оптоэлектронного химического сенсора демонстрируют графики, приведенные на рис. 2. Переходный процесс практически заканчивается после 3-минутного нахождения акрилового гидрогеля в водных растворах солей хрома и кобальта.

Так, если образец полимерного гидрогеля находится в растворе в течение 2 мин и концентрация ионов металлов-загрязнителей изменяется в 10 раз, то показатель преломления изменяется на 0,01 для водных растворов CoCl_2 и на 0,03 для водных растворов CrCl_3 . Таким образом можно предсказывать изменение концентрации раствора по изменению показателя преломления:

— для раствора CoCl_2

$$n(C) = 0,01 \lg C + 1,396,$$

— для раствора CrCl_3

$$n(C) = 0,0232 \lg C + 1,414.$$

Были также исследованы спектральные характеристики акрилового полимерного материала. Исследование проводилось на спектрофотометре Varian Cary 500: диапазон измерения 300...3000 нм с шагом 0,1 нм; измерение спектра осуществлялось со скоростью 16 000 нм/мин в УФ- и видимом диапазоне и со скоростью 64 000 нм/мин — в ближнем ИК-диапазоне. Исследования показали возможность выбора оптимального спектрального диапазона длин волн при использовании полиакрилового гидрогеля в оптоэлектронных химических сенсорах.

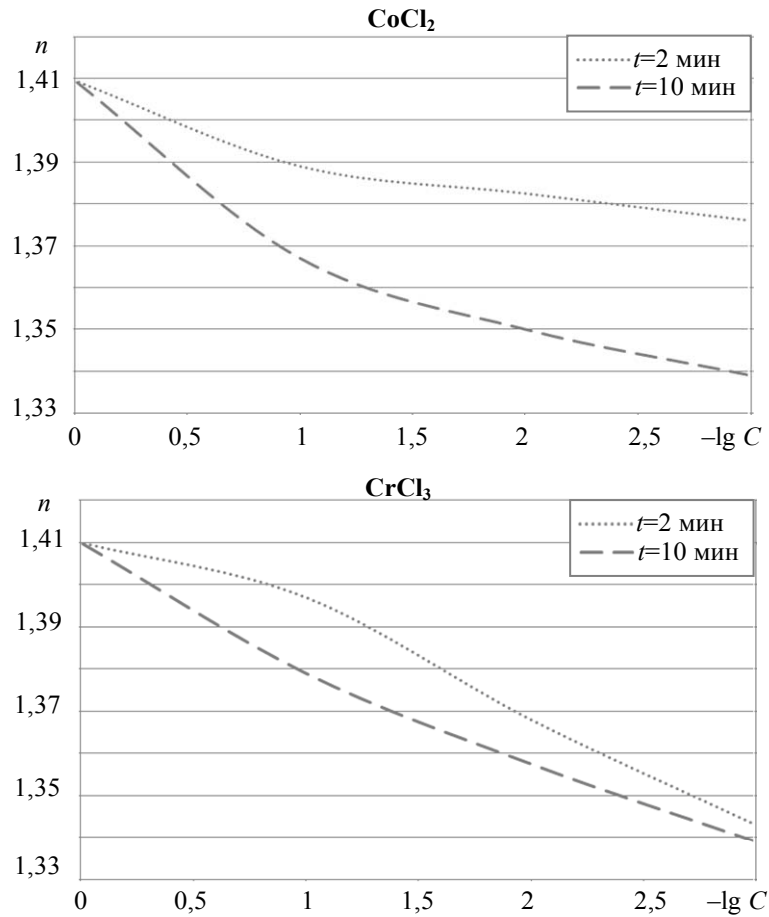


Рис. 1

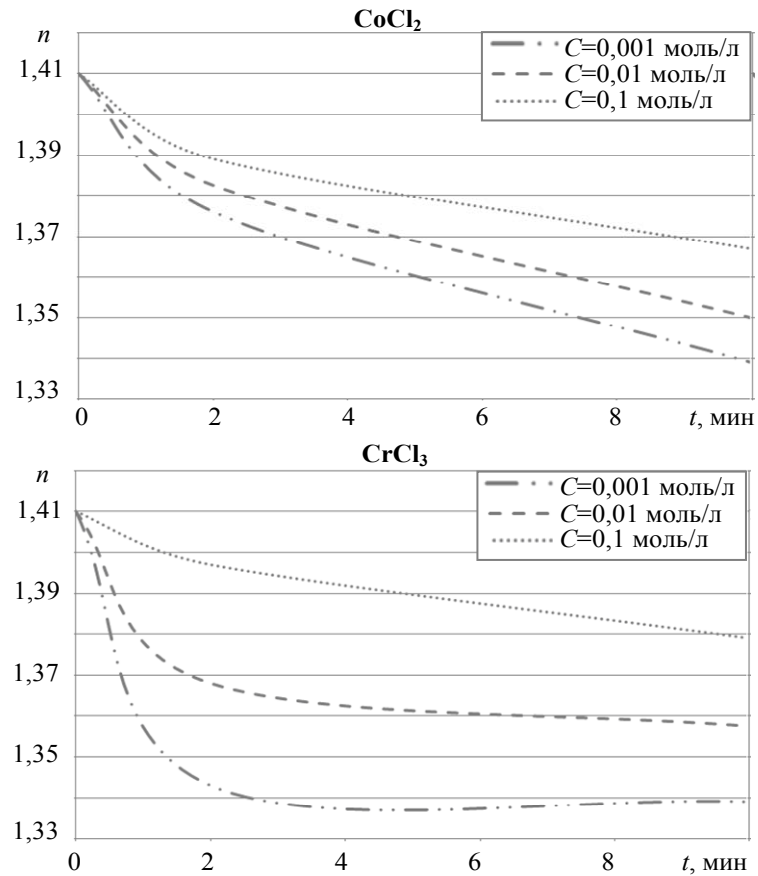


Рис. 2

Таблица 1

Номер образца	Показатель преломления чистого образца	Показатель преломления образца, помещенного в раствор CoCl_2 , при					
		$C=0,1$ моль/л, $t=2$ мин		$C=0,1$ моль/л, $t=10$ мин		$C=0,01$ моль/л, $t=2$ мин	
		$C=0,1$ моль/л, $t=2$ мин	$C=0,1$ моль/л, $t=10$ мин	$C=0,01$ моль/л, $t=10$ мин	$C=0,01$ моль/л, $t=2$ мин	$C=0,001$ моль/л, $t=2$ мин	$C=0,001$ моль/л, $t=10$ мин
1	1,408	1,390	1,366	1,381	1,351	1,374	1,339
2	1,410	1,389	1,366	1,383	1,350	1,379	1,339
3	1,410	1,386	1,368	1,384	1,349	1,375	1,339
4	1,410	1,390	1,367	1,382	1,350	1,375	1,339
	$\bar{n} = 1,4095$	$\bar{n} = 1,367$	$\bar{n} = 1,3825$	$\bar{n} = 1,350$	$\bar{n} = 1,376$	$\bar{n} = 1,339$	
	Показатель преломления раствора $n_{0,1} = 1,334$	Показатель преломления раствора $n_{0,01} = 1,3325$	Показатель преломления раствора $n_{0,001} = 1,3325$	Показатель преломления раствора $n_{0,001} = 1,3325$			

Таблица 2

Номер образца	Показатель преломления чистого образца	Показатель преломления образца, помещенного в раствор CrCl_3 , при					
		$C=0,1$ моль/л, $t=2$ мин		$C=0,1$ моль/л, $t=10$ мин		$C=0,01$ моль/л, $t=2$ мин	
		$C=0,1$ моль/л, $t=2$ мин	$C=0,1$ моль/л, $t=10$ мин	$C=0,01$ моль/л, $t=10$ мин	$C=0,01$ моль/л, $t=2$ мин	$C=0,001$ моль/л, $t=2$ мин	$C=0,001$ моль/л, $t=10$ мин
1	1,408	1,399	1,378	1,361	1,360	1,340	1,339
2	1,410	1,393	1,385	1,366	1,355	1,340	1,339
3	1,410	1,399	1,373	1,376	1,357	1,350	1,339
4	1,410	1,397	1,379	1,368	1,358	1,343	1,339
	$\bar{n} = 1,4095$	$\bar{n} = 1,379$	$\bar{n} = 1,368$	$\bar{n} = 1,3575$	$\bar{n} = 1,343$	$\bar{n} = 1,339$	
	Показатель преломления раствора $n_{0,1} = 1,3365$	Показатель преломления раствора $n_{0,01} = 1,332$	Показатель преломления раствора $n_{0,001} = 1,332$	Показатель преломления раствора $n_{0,001} = 1,332$			

Был проведен полный спектральный анализ чистого гидрогеля во всем возможном диапазоне измерений. На основе анализа полного спектра (рис. 3) можно выделить диапазон, в котором коэффициент пропускания (τ) полимера максимален: так, большая часть ближнего ИК-диапазона непригодна для использования (полимер перестает быть прозрачным для света на этом участке), наиболее перспективным будет являться видимый участок спектра.

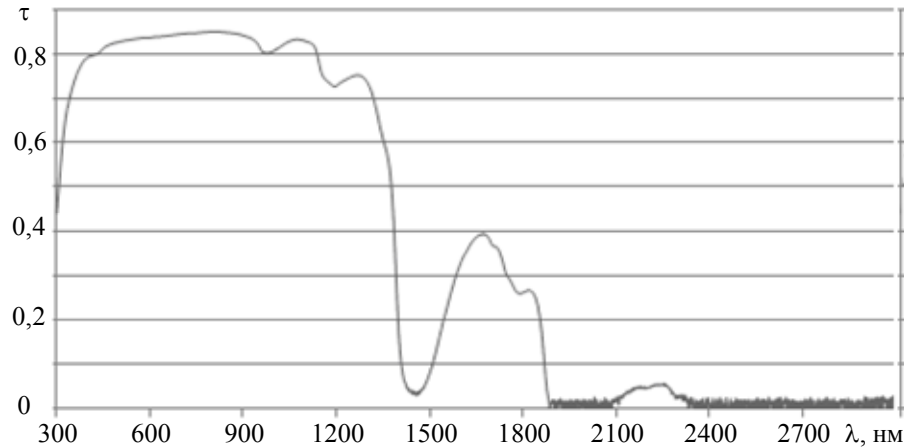


Рис. 3

В диапазоне 300...800 нм коэффициент пропускания измерялся с шагом 0,5 нм. На рис. 4 представлен график зависимости $\tau(\lambda)$ для акрилового гидрогеля, помещенного в раствор CoCl_2 . Как видно из графика, коэффициент пропускания чистого полимера в видимом участке спектра находится в интервале от 0,8 до 0,9, что позволяет его использовать в качестве селективного слоя в интегрально-оптическом сенсоре.

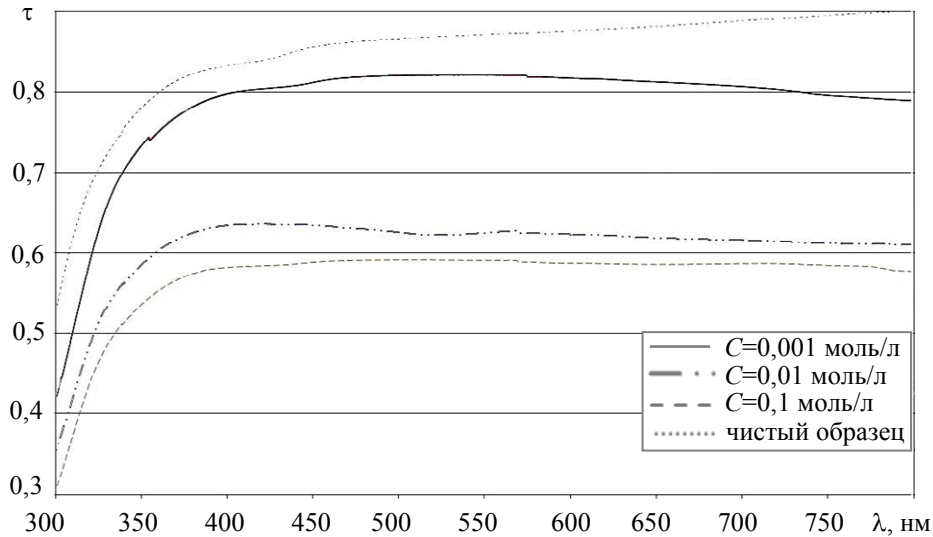


Рис. 4

Результаты исследования оптических свойств акрилового гидрогеля показывают, что показатель преломления и коэффициент пропускания материала изменяются в процессе поглощения ионов-загрязнителей из водных растворов хлоридов кобальта и хрома (III), находящихся в контакте с гидрогелем. При этом материал остается прозрачным в видимой области спектра оптического излучения, что обуславливает возможность его использования в оптоэлектронных системах индикации изменений концентрации примесей в различных солевых растворах поливалентных металлов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Burke C. S., Strb́nik O., McEvoy H. M., MacCraith B. D.* Planar optical sensors and evanescent wave effects // *Optical Chemical Sensors*. 2006. Ch. 10. P. 193—215.
2. *Mohr G. J.* Polymers for optical sensors // *Optical Chemical Sensors*. 2006. Ch. 15. P. 297—321.
3. *Успенская М. В., Кабакова М. М., Сиротинкин Н. В.* Влияние условий синтеза на кинетические параметры реакции сополимеризации и свойства тетразолсодержащего гидрогеля // *Пластические массы*. 2007. № 12.
4. *El-Hamshary H., El-Garawany M., Assubaie N., Al-Eed M.* Synthesis of poly(acrylamide-co-4-vinylpyridine) hydrogels and their application in heavy metal removal // *J. Appl. Polymer. Sci.* 2003. Vol. 89, N 9. P. 2522—2526.
5. *Филиппова О. Е.* „Восприимчивые“ полимерные гели // *Высокомолекулярные соединения*. 2000. Т. 42С, № 12. С. 2328—2352.
6. *Дубровский С. А., Казанский К. С.* Термодинамические основы применения сильнонабухающих гидрогелей в качестве влагоабсорбентов (обзор) // *Высокомолекулярные соединения*. 1993. Т. 35Б, № 10. С. 1712—1721.
7. *Успенская М. В., Сиротинкин Н. В., Горский В. А., Голощанов Ю. Г.* Композиции на основе акрилатных сополимеров и фуллеренов // *Журн. полимерной химии*. 2006. Т. 79, вып. 5. С. 870—872.

Сведения об авторах

- Алексей Леонидович Итин** — аспирант; Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, кафедра твердотельной оптоэлектроники; E-mail: ialexey@bk.ru
- Сергей Борисович Лукин** — канд. техн. наук, доцент; Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, кафедра твердотельной оптоэлектроники; E-mail: lukin@mail.ifmo.ru
- Майя Валерьевна Успенская** — д-р техн. наук, доцент; Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, кафедра информационных технологий топливно-энергетического комплекса; E-mail: mv_uspenskaya@mail.ru
- Валерий Сергеевич Соловьев** — аспирант; Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, кафедра информационных технологий топливно-энергетического комплекса; E-mail: solovievvs@gmail.com

Рекомендована кафедрой
твердотельной оптоэлектроники

Поступила в редакцию
03.10.11 г.

КРАТКИЕ СООБЩЕНИЯ

УДК 681.3

А. Н. РОМАНОВ, Е. В. ХАУЛА, З. Т. ФАТТАХОВА, А. А. ВЕБЕР,
В. Н. КОРЧАК, В. Б. ЦВЕТКОВ, В. Б. СУЛИМОВ

ЛАЗЕРНАЯ АКТИВНАЯ СРЕДА НА ОСНОВЕ ФТОРИДНОГО СТЕКЛА ZBLAN, ЛЕГИРОВАННОГО ВИСМУТОМ

Показано, что добавление в композицию фторидного стекла ZBLAN ($53\text{ZrF}_4\text{—}20\text{BaF}_2\text{—}4\text{LaF}_3\text{—}20\text{NaF—}3\text{AlF}_3$) фторида висмута BiF_3 приводит к частичному восстановлению последнего с образованием люминесцирующих субвалентных соединений висмута. Полученное стекло характеризуется широким спектром люминесценции в ближнем ИК-диапазоне (1000—1500 нм), хорошим оптическим качеством и может рассматриваться как перспективная оптическая среда для создания широкополосных оптических усилителей и перестраиваемых лазеров. Обсуждается также природа люминесцирующих субвалентных соединений висмута в стекле ZBLAN.

Ключевые слова: субвалентный висмут, люминесценция, фторидные стекла, оптический усилитель.

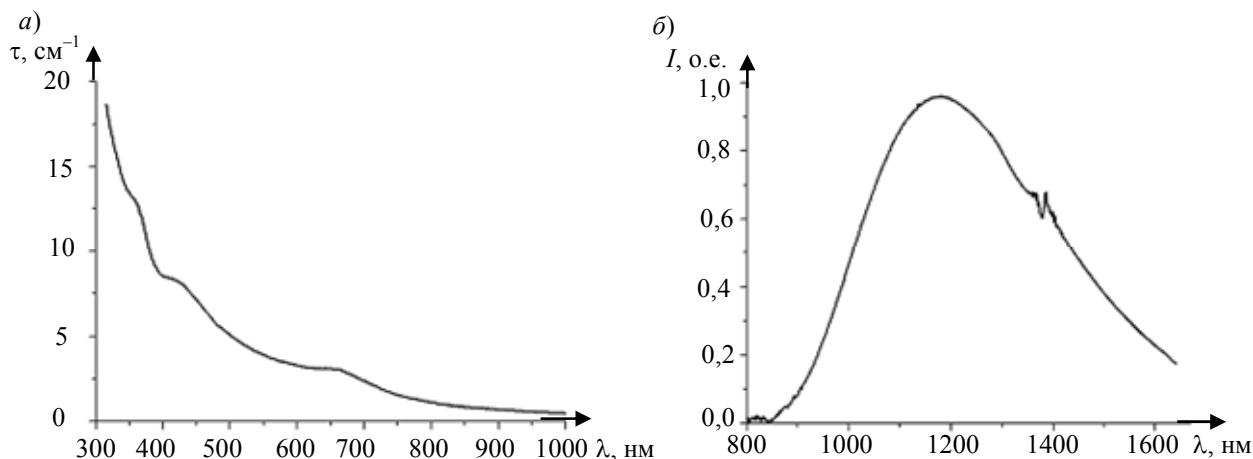
Многие стекла и кристаллические материалы, легированные висмутом, являются источником широкополосной (1000—2500 нм) и долгоживущей (десятки и сотни микросекунд) ИК-фотолюминесценции [1, 2]. С момента обнаружения [1] природа активных центров, ответственных за появление этой люминесценции, остается не совсем понятной, хотя установлено, что существуют несколько различных люминесцентных центров, в которых висмут проявляет степень окисления ниже обычной (+3). Многие подобные соединения известны с 1950-х гг. (субвалентные соединения висмута) и обнаружение у некоторых из них (Bi^+ , Bi_5^{3+} , Bi_8^{2+}) способности к фотолюминесценции в ИК-диапазоне [3—6] представляется в настоящее время интересным.

Среди множества фторидных стекол, полученных на сегодняшний день, наиболее устойчивым и пригодным для изготовления оптических элементов является состав ZBLAN (пропорция в молярных частях: $53\text{ZrF}_4\text{—}20\text{BaF}_2\text{—}4\text{LaF}_3\text{—}20\text{NaF—}3\text{AlF}_3$) [7]. В настоящей статье исследуется возможность изготовления стекол, близких по составу к ZBLAN, легированных субвалентными соединениями висмута.

Для изучения выбран состав, отличающийся от классической рецептуры ZBLAN добавлением 5 молярных долей BiF_3 ($53\text{ZrF}_4\text{—}20\text{BaF}_2\text{—}4\text{LaF}_3\text{—}20\text{NaF—}3\text{AlF}_3\text{—}5\text{BiF}_3$; ZBLANB). Во избежание избыточного восстановления BiF_3 (до металла) аммиаком процесс изготовления проводился в две стадии [8], причем на первой стадии стекло ZBLAN изготавливалось без BiF_3 с использованием бифторида аммония.

Исследование спектров оптического поглощения, люминесценции, а также временных зависимостей затухания люминесценции проводилось в соответствии с методикой, изложенной

в работе [8]. Спектры поглощения τ ($\lambda_{\max} = 360, 425, 665$ нм) и люминесценции I (широкая полоса с $\lambda_{\max} = 1185$ нм) стекла ZBLANB (см. рисунок, а, б, соответственно) практически идентичны тем, что наблюдались ранее в составах $\text{ZrF}_4\text{—BiF}_3\text{—NaF}$ и $\text{ZrF}_4\text{—BaF}_2\text{—BiF}_3$, и обусловлены присутствием субвалентных соединений висмута [8]. Регистрация спектра люминесценции производилась при комнатной температуре и длине волны возбуждения $\lambda_{\text{ex}} = 470$ нм.



При комнатной температуре люминесценция стекла ZBLANB затухает в соответствии с законом „растянутой экспоненты“ $I = I_0 \exp(t/\tau_0)^{1/2}$ с характерным временем затухания $\tau_0 = 13$ мкс, что также хорошо соотносится с результатами, полученными для фторидных стекол $\text{ZrF}_4\text{—BiF}_3\text{—NaF}$ и $\text{ZrF}_4\text{—BaF}_2\text{—BiF}_3$ [8].

Таким образом подтверждена возможность получения устойчивых фторидных стекол, близких по составу к ZBLAN, содержащих субвалентные соединения висмута (возможно Bi_8^{2+} , но определенно не Bi^+ и Bi_5^{3+}), люминесцирующие в широкой полосе (950—1600 нм) ближнего ИК-диапазона.

Работа выполнена в рамках государственного контракта № 07.514.11.4059 от 12 октября 2011 г.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Fujimoto Y., Nakatsuka M. Optical amplification in bismuth-doped silica glass // Appl. Phys. Lett. 2003. Vol. 82(19). P. 3325—3326.
2. Dianov E. M. Bi-doped glass optical fibers: is it a new breakthrough in laser materials? // J. Non-Cryst. Solids. 2009. Vol. 355(37—42). P. 1861—1864.
3. Sun H.-T., Sakka Y., Gao H., Miwa Y., Fujii M., Shirahata N., Bai Z., Li J.-G. Ultrabroad near-infrared photoluminescence from $\text{Bi}_5(\text{AlCl}_4)_3$ crystal // J. Mater. Chem. 2011. Vol. 21(12). P. 4060—4063.
4. Cao R., Peng M., Wondraczek L., Qiu J. Superbroadband near-to-mid-infrared luminescence from Bi_5^{3+} in $\text{Bi}_5(\text{AlCl}_4)_3$ // Opt. Express. 2012. Vol. 20(3) P. 2562—2571.
5. Romanov A. N., Fattakhova Z. T., Veber A. A., Usovich O. V., Haula E. V., Korchak V. N., Tsvetkov V. B., Trusov L. A., Kazin P. E., Sulimov V. B. On the origin of near-IR luminescence in Bi-doped materials (II). Subvalent monocation Bi^+ and cluster Bi_5^{3+} luminescence in $\text{AlCl}_3/\text{ZnCl}_2/\text{BiCl}_3$ chloride glass // Opt. Express. 2012. Vol. 20(7). P. 7212—7220.
6. Sun H.-T., Sakka Y., Shirahata N., Gao H., Yonezawa T. Experimental and theoretical studies of photoluminescence from Bi_8^{2+} and Bi_5^{3+} stabilized by $[\text{AlCl}_4]^-$ in molecular crystals // J. Mater. Chem. Accepted Manuscript. 2012.
7. Ohsawa K., Shibata T., Nakamura K., Yoshida S. Fluorozirconate glasses for infrared transmitting optical fibers // Proc. of the 7th European Conf. on Optical Communication (ECOC). Sept. 1981. Copenhagen, Denmark. P. 1.1-1—1.1-4.

8. Romanov A. N., Haula E. V., Fattakhova Z. T., Veber A. A., Tsvetkov V. B., Zhigunov D. M., Korchak V. N., Sulimov V. B. Near-IR luminescence from subvalent bismuth species in fluoride glass // Opt. Mater. 2011. Vol. 34(1). P. 155—158.

Сведения об авторах

- Алексей Николаевич Романов** — канд. физ.-мат. наук; Научно-исследовательский вычислительный центр Московского государственного университета им. М. В. Ломоносова; ООО „Димонта“; E-mail: alexey.romanov@list.ru
- Елена Валерьевна Хаула** — Институт химической физики им. Н. Н. Семенова РАН, Москва; научный сотрудник; E-mail: akhaua@gmail.com
- Зухра Тимуровна Фаттахова** — канд. хим. наук; Институт химической физики им. Н. Н. Семенова РАН, Москва; E-mail: myb13@post.ru
- Александр Александрович Вебер** — Институт общей физики РАН, Москва; младший научный сотрудник; E-mail: alexveb@gmail.com
- Владимир Николаевич Корчак** — д-р хим. наук, профессор; Институт химической физики им. Н. Н. Семенова РАН, Москва; E-mail: korchak@chph.ras.ru
- Владимир Борисович Цветков** — д-р физ.-мат. наук; Институт общей физики РАН, Москва; E-mail: vb1954@mail.ru
- Владимир Борисович Сулимов** — д-р физ.-мат. наук; Научно-исследовательский вычислительный центр Московского государственного университета им. М. В. Ломоносова; ООО „Димонта“; E-mail: vs@dimonta.com

Рекомендована
Московским государственным
университетом

Поступила в редакцию
02.04.12 г.

SUMMARY

P. 5—9.

AN ALGORITHM OF GORDON — MILLS — WELCH SEQUENCE FORMATION

An algorithm is proposed for formation of Gordon — Mills — Welch sequences, based on matrix representation of sequences with compound period. These sequences are formed over finite fields with double expansion.

Keywords: sequences with compound period, correlation function, finite fields, indivisible and primitive polynomials.

Data on author

Victor G. Starodubtsev — Cand. Techn. Sci.; Multiservice Nets and Telecommunications, Ltd., St. Petersburg; Head of Department; E-mail: vgstarod@mail.ru

P. 10—15.

AN ELECTRODYNAMIC MODEL OF THE NEAR-FIELD HIGH-FREQUENCY SOUNDING OF BIOLOGICAL OBJECTS

An electrodynamic model of high-frequency near-field probing of biological objects is presented. The study of sprout zones activity in teenagers is used as an example of the model application. The information signal from a biological object is shown to depend not only on its dielectric permeability but also on the object conductivity.

Keywords: electrodynamic model, high-frequency near-field probing, dielectric constant, information signal, conductivity.

Data on authors

Yury A. Baloshin — Dr. Techn. Sci., Professor; St. Petersburg National Research University of Information Technologies, Mechanics and Optics, Department of Physics; E-mail: baloshin1940@mail.ru

Mikhail V. Mekhrengin — Student; St. Petersburg National Research University of Information Technologies, Mechanics and Optics, Department of Optical Communications Physics and Technology; E-mail: mehrengin@gmail.com

Aleksey V. Arsen'ev — Cand. Med. Sci.; Children's Rehabilitation Center for Orthopedics and Traumatology "Ogonyok", St. Petersburg; Head of 4th Clinical Department; E-mail: stivamat@rambler.ru

Anatoly A. Sorokin — Cand. Techn. Sci.; Ustinov Baltic State Technical University "VOENMECH", Department of Radioelectronic Control Systems, St. Petersburg; E-mail: an_sor@mail.ru

P. 16—21.

DESIGN OF ROBUST MODAL CONTROLLER OPERATING UNDER DISTURBING AND DRIVING ACTIONS

The problem of modal controller design is considered on the base of a criterion providing the optimal balance between quality management and robust properties of the system.

Keywords: algorithms, construction of modal controllers, robustness, quality.

Data on authors

- Mikhail M. Bezryadin* — Post-Graduate Student; Voronezh State University, Department of Technical Cybernetics and Automatic Control; E-mail: maickel@yandex.ru
- Gennady I. Lozgachev* — Dr. Techn. Sci., Professor; Voronezh State University, Department of Technical Cybernetics and Automatic Control; E-mail: Prof-lozgachev@yandex.ru

P. 21—27.

AN ALGORITHM OF CORRECTION OF AUTONOMOUS UNDERWATER VEHICLE CONTROL STRUCTURE FOR ATTAINABILITY DOMAIN CONSTRUCTION

The problem of attainability domain construction for autonomous underwater vehicle is considered. The proposed solution is based on the method of correction of parameters of the control structure formed with the use of Pontryagin's maximum principle. Results of digital modeling are presented, comparison with solution obtained with Krylov — Chernousko method is carried out.

Keywords: Pontryagin's maximum principle, forecasting model, attainability domain, autonomous underwater vehicle.

Data on authors

- Veniamin V. Malyshev* — Dr. Techn. Sci., Professor; Moscow Aviation Institute (National Research University), Department of Systems Analysis and Control; E-mail: veniaminmalyshev@mail.ru
- Dmitry S. Kabanov* — Post-Graduate Student; Moscow Aviation Institute (National Research University), Department of Systems Analysis and Control; E-mail: kabanovds@mail.ru

P. 28—31.

SYNTHESIS OF DIGITAL FILTERS FOR GENERATOR TRANSFORMERS WITH INCREASED SENSITIVITY

The problem of digital self-oscillation system synthesis is considered. A solution to the problem based on the use of digital filters with tunable phase-frequency characteristic is presented.

Keywords: digital self-oscillation system, phase balance, digital filter, amplitude-frequency characteristic, phase-frequency characteristic.

Data on authors

- Victor V. Ivanov* — Dr. Techn. Sci.; Volga Region State University of Service, Department of Informational and Electronic service, Togliatti; E-mail: Ivanov@tolgas.ru
- Victor K. Shakursky* — Dr. Techn. Sci., Professor; Togliatti State University, Department of Power Supply and Electrical Engineering; E-mail: Shakurskiy@mail.ru
- Maxim V. Shakursky* — Volga Region State University of Service, Department of Informational and Electronic service, Togliatti; Head of Laboratory; E-mail: M.Shakurskiy@gmail.com

P. 32—35.

ATTACHED MASSES ANALYSIS OF ELASTIC SENSITIVE ELEMENTS OF MERCURY REED SWITCHES

The design features of mercury reed switches are performed and the factors affecting the value of the attached masses of elastic sensing elements are determined. An improved model of the attached mass of the elements is presented, analytical expression for the amplitude-frequency characteristic is derived.

Keywords: reed switches, the attached mass, the elastic sensing elements.

Data on authors

- Vera L. Tkalic* — Dr. Techn. Sci., Professor; St. Petersburg National Research University of Information Technologies, Mechanics and Optics, Department of Computer Systems Design; E-mail: Vera_Leonidovna_Tkalic@mail.ru
- Rimma Ya. Labkovskaya* — Post-Graduate Student; St. Petersburg National Research University of Information Technologies, Mechanics and Optics, Department of Computer Systems Design; E-mail: studsovet_itmo@mail.ru
- Olga I. Pirozhnikova* — Post-Graduate Student; St. Petersburg National Research University of Information Technologies, Mechanics and Optics, Department of Computer Systems Design; E-mail: studsovet_itmo@mail.ru

P. 36—41.

A LENS FOR CHROMATIC SELECTION OF SPECTRAL COMPONENTS IN RING-SHAPED POLYCHROMATIC OBJECT IMAGE

A lens is designed for chromatic selection of spectral components in image of polychromatic ring-shaped object, the color of the ring image being dependent on the front focal length value. Several recommendations for design of the systems under consideration are formulated.

Keywords: projection lens, optimization, chromatic aberrations.

Data on author

- Andrey V. Pravdivtsev* — Research & Design Group “Constructive Cybernetics”, Moscow; Leading Specialist; E-mail: apravd@gmail.com

P. 42—47.

EFFECTIVE EXCITATION OF POLARITONIC MODES IN OPTICAL CAVITY WITH RESONANT INVERSIONLESS MEDIUM

The properties and lifetimes of cavity modes in resonant inversionless medium are studied analytically and numerically in semi-classical local and distributed approximation. Increase in the modes lifetime in strong-coupling regime is demonstrated. New effective method of polariton laser pumping is proposed and investigated numerically. Numerical model of laser with narrowband absorber and broadband active medium is developed for ring cavity. Possibility of spectral condensation phenomena is demonstrated with numerical calculations.

Keywords: optical cavity, polaritonic modes, strong coupling.

Data on authors

- Rostislav M. Arkhipov* — Post-Graduate Student; St. Petersburg State University, Department of Optics; E-mail: arkhpm@mail.wplus.net
- Mikhail V. Arkhipov* — Cand. Phys.-Math. Sci.; St. Petersburg State University, Department of Optics; E-mail: arkhpm@mail.wplus.net
- Valentin S. Egorov* — Dr. Phys.-Math. Sci., Professor; St. Petersburg State University, Department of Optics; E-mail: valentin_egorov@mail.ru
- Igor A. Chekhonin* — Cand. Phys.-Math. Sci.; St. Petersburg State University, Department of Optics; E-mail: chekhonin@mail.ru

- Mikhail A. Chekhonin** — St. Petersburg State University, Department of Optics; Scientist;
E-mail: chekhonin@mail.ru
- Sergey N Bagaev** — Dr. Phys.-Math. Sci., Professor; Institute of Laser Physics, Siberian Branch of Russian Academy of Sciences, Novosibirsk; Academician of RAS, Director;
E-mail: bagayev@laser.nsc.ru

P. 48—51.

MODELING OF SECONDARY OPTICS FOR LIGHT DIODES ON THE BASE OF TOTAL-REFLECTION LENS

An example of modeling of total-reflection lens for high-power light diode is presented. The modeling process in Zemax program is demonstrated, the effects of the shape of internal and external surfaces of complex lens on the system characteristics is investigated.

Keywords: light diode, secondary optics, complex lens, total reflection effect, modeling.

Data on authors

- Galina E. Romanova** — Cand. Techn. Sci.; St. Petersburg National Research University of Information Technologies, Mechanics and Optics, Department of Applied and Computer Optics;
E-mail: romanova_g_e@mail.ru
- Pavel S. Chechurov** — Student; St. Petersburg National Research University of Information Technologies, Mechanics and Optics, Department of Applied and Computer Optics;
E-mail: ChechurovPS@gmail.com

P. 52—55.

A METHOD FOR AUTOMATIC COMPENSATION OF VIBRATIONS IN SHADOW DEVICE WITH THE USE OF OPTIMAL DISCRIMINATOR

A statistical model of shadow instrument structure is presented. The model allows for compensation of noise vibration components with the use of a closed-loop system with negative feedback.

Keywords: shadow device, likelihood function, optimal estimation, reference signal, vibration, CCD matrix

Data on authors

- Lyubov' A. Ivanova** — Television Research Institute, St. Petersburg; Leading Engineer;
E-mail: vlaluba@yandex.ru
- Alla V. Meleshko** — Cand. Techn. Sci.; All-Russian Research Institute of Radio Equipment; St. Petersburg;
E-mail: allaluna@list.ru
- Vyacheslav V. Pyatkov** — Dr. Techn. Sci., Professor; Television Research Institute, St. Petersburg;
E-mail: pyatkov1955@mail.ru
- Vladimir A. Resovsky** — Cand. Techn. Sci.; Television Research Institute, St. Petersburg;
E-mail: vlares@yandex.ru

P. 56—60.**INTERFEROMETER-REFRACTOMETER FOR DETERMINATION OF GASEOUS AND LIQUID SAMPLES COMPOSITION**

An interference refractometer is used for realization of a new method for determination of composition and properties of chemical solutions in technological purification lines and in synthesis of chemicals of various classes is described. Advantages of the detector over existing devices are demonstrated.

Keywords: refractometer, refractive index, interferometer.

Data on authors

- Boris P. Kuzmin** — Special Design Office “Test”, St. Petersburg; Director
Nadezhda K. Maltseva — Cand. Techn. Sci.; St. Petersburg National Research University of Information Technologies, Mechanics and Optics, Department of Optical-Electronic Devices and Systems; E-mail: maltseva@grv.ifmo.ru
Artur V. Minin — Student; St. Petersburg National Research University of Information Technologies, Mechanics and Optics, Department of Optical-Electronic Devices and Systems; E-mail: mavne@yandex.ru

P. 61—67.**STUDY OF METROLOGICAL CHARACTERISTICS OF A MEASURING OPTICAL-MECHANICAL HEAD**

Metrological characteristics of a measuring optical-mechanical head are analyzed. The measuring range for diffuse-reflecting surface shape measurement, output signal amplitude, and measurement errors are studied. Comparative analysis of the head and existing certified devices is carried out.

Keywords: optical-mechanical head, interferometric signal envelope, spring parallelogram mechanism, speckle modulation.

Data on authors

- Evgeny E. Mayorov** — Cand. Techn. Sci.; Mechnikov Northwestern State Medical University, Department of Medical Informatics and Physics, St. Petersburg; E-mail: mayorov_ee@mail.ru
Alexander Ch. Mashek — Budyonny Military Academy of Communications, Department of Physics and Mathematics, St. Petersburg; Senior Lecturer; E-mail: galusinka@mail.ru
Viktor T. Prokopenko — Dr. Techn. Sci., Professor; St. Petersburg National Research University of Information Technologies, Mechanics and Optics; Department of Solid-State Optoelectronics; E-mail: prokopenko@mail.ifmo.ru
Nina Ya. Chistyakova — Cand. Phys.-Math. Sci.; Mechnikov Northwestern State Medical University, Department of Medical Informatics and Physics, St. Petersburg; E-mail: medbiophys@rambler.ru

P. 68—74.

MODELING OF THERMAL CONDITIONS AND THERMAL ABERRATIONS OF A SMALL-SIZED SPACE TELESCOPE

A method for calculation of thermal condition and heat-induced aberration of the electro-optical system for remote sensing of the Earth from a micro satellite is presented. Result of calculations demonstrates that the temperature increments of the telescope elements and the thermo-optical aberrations are proportional to the operational mode duration. The chosen thermo-mechanical scheme is shown to afford the telescope thermal stability during operation.

Keywords: Earth remote sensing, optical-electronic systems, microsatellite, radiative heat transfer, thermo-optical aberration.

Data on authors

- Yulia V. Bayova* — Post-Graduate Student; St. Petersburg National Research University of Information Technologies, Mechanics and Optics; Department of Computer Thermal Physics and Energy-Physical Monitoring; E-mail: yul.bayo@yandex.ru
- Anatoly V. Demin* — Dr. Techn. Sci., Professor; St. Petersburg National Research University of Information Technologies, Mechanics and Optics; Department of Informatics and Applied Mathematics; E-mail: dav_60@mail.ru
- Sergey I. Khankov* — Dr. Techn. Sci.; St. Petersburg National Research University of Information Technologies, Mechanics and Optics; Department of Computer Thermal Physics and Energy-Physical Monitoring
- Sergey I. Zhukov* — Public Corporation “LOMO”, St. Petersburg; Chief Specialist

P. 75—80.

IMPLEMENTATION OF VIRTUAL MODELING SYSTEMS FOR POLIMER COMPOSITE MATERIALS SELECTION AND DESIGN

The correct choice of composite material is considered to be the key problem in new product design. Application of computer technologies in the selection and design of polymer composite materials is analyzed. Implementation of computer-aided engineering system Moldex3D for injection molding process modeling is described.

Keywords: polymer composite material, injection molding, computer-aided engineering systems.

Data on authors

- Eugeny I. Yablochnikov* — Cand. Techn. Sci.; St. Petersburg National Research University of Information Technologies, Mechanics and Optics; Department of Instrument-Making Technology; E-mail: eugeny@bee-pitron.spb.su
- Vladimir A. Braginsky* — Cand. Techn. Sci.; Journal “Metalloobrabotka”, St. Petersburg; Member of Editorial Board; E-mail: ipspe@mail.ru
- Aleksey S. Vosorkin* — Post-Graduate Student; St. Petersburg National Research University of Information Technologies, Mechanics and Optics; Department of Instrument-Making Technology; E-mail: asvosorkin@gmail.com

P. 80—85.

STUDY OF RADIATION RESISTANCE OF DIELECTRIC COATING DEPOSITED ON OPTICAL SURFACE

A method for laser induced damage (LID) threshold measurement both within volume of transparent dielectrics and at surface of high-energy laser optical components is proposed. The technique makes it possible to determine the optical breakdown statistics in a chosen area of optical element for single-shot exposure and for accumulation regime. A technique of additional chemical-mechanical surface polishing is proposed, the LID threshold for coatings of optical components with surfaces subjected to the additional processing is measured and compared with regular treatment.

Keywords: radiation resistance, transparent dielectric, laser-induced breakdown, surface finishing.

Data on authors

- Sergey V. Gagarsky* — Cand. Phys.-Math. Sci.; St. Petersburg National Research University of Information Technologies, Mechanics and Optics; Department of Laser Technologies and Bio-Medicine Optics; E-mail: s.gagarsky@mail.ru
- Vladimir S. Ermolaev* — St. Petersburg National Research University of Information Technologies, Mechanics and Optics; Department of Laser Technologies and Bio-Medicine Optics; Senior Scientist
- Andrey N. Sergeev* — Post-Graduate Student; St. Petersburg National Research University of Information Technologies, Mechanics and Optics; Department of Photonics and Optical Information Technology; E-mail: mg_phoenix@yahoo.com
- Mikhail V. Puzyk* — Cand. Chem. Sci.; Herzen State Pedagogical University of Russia, Department of Inorganic Chemistry, St. Petersburg; E-mail: puzyk@mail.ru

P. 85—90.

STUDY OF OPTICAL PROPERTIES OF ACRYLIC HYDROGEL USED IN POLLUTANTS DISPLAY SYSTEMS

Results of investigations of optical properties of acrylic hydrogel used as a sensitive element in optoelectronic systems of pollutants display are presented. Spectral features and functions of the hydrogel refractive index variation under exposure to different pollutants are measured at various concentrations of polyvalent metals at room temperature.

Keywords: acrylic hydrogel, spectral characteristics, refractive index, pollutants, swelling, sorption.

Data on authors

- Aleksey L. Itin* — Post-Graduate Student; St. Petersburg National Research University of Information Technologies, Mechanics and Optics; Department of Solid State Optoelectronics; E-mail: ialexey@bk.ru
- Sergey B. Lukin* — Cand. Techn. Sci.; St. Petersburg National Research University of Information Technologies, Mechanics and Optics; Department of Solid State Optoelectronics; E-mail: lukin@mail.ifmo.ru
- Maya V. Uspenskaya* — Dr. Techn. Sci.; St. Petersburg National Research University of Information Technologies, Mechanics and Optics; Department of Informational Technologies of Fuel-Energy Complex; E-mail: mv_ustenskaya@mail.ru
- Valery S. Soloviev* — Post-Graduate Student; St. Petersburg National Research University of Information Technologies, Mechanics and Optics; Department of Informational Technologies of Fuel-Energy Complex; E-mail: solovievvs@gmail.com

P. 91—93.

LASER ACTIVE MEDIUM ON THE BASE OF BISMUTH-DOPED FLUORIDE GLASS ZBLAN

Addition of bismuth fluoride BiF_3 to ZBLAN fluoride glass with composition $(53\text{ZrF}_4—20\text{BaF}_2—4\text{LaF}_3—20\text{NaF}—3\text{AlF}_3)$ is shown to lead to partial reduction of bismuth fluoride to luminescent subvalent bismuth compounds. The resulting glass is of high optical quality and demonstrates broadband luminescence in Near-IR (1000—1500 nm). The glass is reported to comprise a promising active media for broadband optical amplifiers and tunable lasers. The nature on near-infrared luminescent subvalent bismuth centers in ZBLAN glass is discussed.

Keywords: subvalent bismuth, luminescence, fluoride glasses, optical amplifier.

Data on authors

- Aleksey N. Romanov* — Cand. Phys.-Math. Sci.; Research Computing Senter, Lomonosov Moscow State University; LLC “Dimonta”; E-mail: alexey.romanov@list.ru
- Elena V. Haula* — Semenov Institute of Chemical Physics, RAS, Moscow; Scientist; E-mail: akhaua@gmail.com
- Zukhra T. Fattakhova* — Cand. Chem. Sci.; Semenov Institute of Chemical Physics, RAS, Moscow; E-mail: myb13@post.ru
- Alexander A. Veber* — General Physics Institute, RAS, Moscow; Junior Scientist; E-mail: alexveb@gmail.com
- Vladimir N. Korchak* — Dr. Chem. Sci., Professor; Semenov Institute of Chemical Physics, RAS, Moscow; E-mail: korchak@chph.ras.ru
- Vladimir B. Tsvetkov* — Dr. Phys.-Math. Sci.; General Physics Institute, RAS, Moscow; E-mail: vb1954@mail.ru
- Vladimir B. Sulimov* — Dr. Phys.-Math. Sci.; Research Computing Senter, Lomonosov Moscow State University; LLC “Dimonta”; E-mail: vs@dimonta.com

В дополнение к ранее опубликованному

Статья Бирюлина Г. В., Егорова В. И., Мурова С. Ю., Невского И. В. „Оптимизация конструкции системы охлаждения электронного модуля“, опубликованная в журнале „Изв. вузов. Приборостроение“, 2012, № 3, подготовлена по результатам работ, проводимых при финансовой поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации, государственный контракт № 16.516.11.6102.

Статья Лаповка Е. В., Ханкова С. И. „Аналитическое описание нестационарных температур изотермического объекта в условиях его лучистого теплообмена с окружающей средой“, опубликованная в журнале „Изв. вузов. Приборостроение“, 2012, № 3, подготовлена по результатам работ, проводимых при финансовой поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации, государственный контракт № 16.516.11.6102.