

Оптический журнал

Оптическое приборостроение и метрология
Optical instrumentation and metrology

DOI: 10.17586/1023-5086-2023-90-06-38-49

УДК 520.248

Анализатор поляризации оптического излучения для космического спектромагнитографа «Тахомаг-МКС»

Илья Емельянович Кожеватов¹, Евгений Антонович Руденчик²,
Дмитрий Евгеньевич Силин^{3✉}, Сергей Евгеньевич Стукачев⁴,
Елена Хусаиновна Куликова⁵

^{1, 3, 4}Институт прикладной физики им. А.В. Гапонова-Грехова Российской академии наук,
Нижний Новгород, Россия

²Институт земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн им. Н.В. Пушкина
Российской академии наук, г. Троицк, Москва, Россия

⁵Национальный исследовательский Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского,
Нижний Новгород, Россия

¹kzh-ie@mail.ru <https://orcid.org/0000-0003-1169-7547>

³silindm@list.ru <https://orcid.org/0000-0001-5962-2080>

⁴stukachev@ipfran.ru <https://orcid.org/0000-0002-4307-5542>

⁵kex-2010@mail.ru <https://orcid.org/0000-0001-5183-2024>

Аннотация

Предмет исследования. В работе описывается анализатор поляризации оптического излучения, разработанный для солнечного спектромагнитографа космического базирования «Тахомаг-МКС». Статья является третьей из серии статей, посвященных разработке солнечного магнитографа, планируемого к размещению на российском сегменте международной космической станции. В первых двух статьях серии, опубликованных ранее в этом же журнале, представлены описание солнечного телескопа и оптического дифракционного спектрографа, также являющихся составными частями спектромагнитографа «Тахомаг-МКС». Цель работы заключалась в разработке анализатора поляризации параллельного типа для спектромагнитографа «Тахомаг-МКС», который бы при измерении всех компонент вектора Стокса в выбранных спектральных линиях обладал необходимым разрешением и точностью, а также быстрым действием для исследования динамики быстро протекающих процессов в фотосфере Солнца. **Метод.** В работе впервые представлен анализатор поляризации для космического солнечного магнитографа, работающий по принципу одновременного получения данных во всех поляризациях. Характерным отличием прибора является не только отсутствие в составе традиционных модуляторов поляризации, но и достаточно малые габаритно-весовые характеристики, что важно именно для космических приборов.

Основные результаты. Показано, что даже в космическом исполнении анализатор поляризации параллельного типа обеспечивает построение изображений спектра в различных поляризациях с требуемыми угловым разрешением $0,35''$ по критерию Рэлея на поле зрения $5'$ и спектральным разрешением 30 м\AA в диапазоне $2,52 \text{ \AA}$, что соответствует характеристикам солнечного оптического телескопа и спектрографа спектромагнитографа «Тахомаг-МКС». **Практическая значимость.** Разработка спектромагнитографа «Тахомаг-МКС» поможет в решении актуальных задач физики Солнца и физики плазмы и создаст задел для подготовки к более сложным миссиям, связанным с исследованиями Солнца с близких расстояний.

Ключевые слова: солнечный магнитограф, анализатор поляризации параллельного типа, параметры Стокса, калибровка, компенсация aberrаций

Благодарность: работа выполнена в рамках Федеральной космической программы за счёт финансовых средств государственного контракта «МКС (Эксплуатация) — Эксплуатация-3» и была поддержана Министерством науки и высшего образования РФ (проект № 0030-2021-0015).

Ссылка для цитирования: Кожеватов И.Е., Руденчик Е.А., Силин Д.Е., Стукачев С.Е., Куликова Е.Х. Анализатор поляризации для космического спектромагнитографа «Тахомаг-МКС» // Оптический журнал. 2023. Т. 90. № 6. С. 38–49. <http://doi.org/10.17586/1023-5086-2023-90-06-38-49>

Коды OCIS: 120.5410, 350.1260, 350.6090, 220.4830, 220.1000.

Optical radiation polarization analyzer for Tachomag-International Space Station space-based spectromagnetograph

ILYA KOZHEVATOV¹, EVGENIY RUDENCHIK², DMITRY SILIN^{3✉},
SERGEY STUKACHEV⁴, ELENA KULIKOVA⁵

^{1, 3, 4}A.V. Gaponov-Grekhov Institute of Applied Physics of the Russian Academy of Sciences,
Nizhny Novgorod, Russia

²Pushkov Institute of Terrestrial Magnetism, Ionosphere, and Radio Wave Propagation of the Russian Academy
of Sciences, Troitsk, Moscow, Russia

⁵Lobachevsky National Research State University of Nizhny Novgorod, Nizhny Novgorod, Russia

¹kzh-ie@mail.ru <https://orcid.org/0000-0003-1169-7547>

³silindm@list.ru <https://orcid.org/0000-0001-5962-2080>

⁴stukachev@ipfran.ru <https://orcid.org/0000-0002-4307-5542>

⁵kex-2010@mail.ru <https://orcid.org/0000-0001-5183-2024>

Abstract

Subject of study. The paper describes an optical radiation polarization analyzer developed for the Tachomag-International Space Station space-based solar spectromagnetograph. The article is the third in the series of articles devoted to the development of a solar magnetograph planned for deployment on the Russian segment of the International Space Station. The first two articles of the series, published earlier in this Journal, describe the solar telescope and the optical diffraction spectrograph, which are also components of the Tachomag-International Space Station spectromagnetograph. **Aim of study** was to develop a parallel-type polarization analyzer for the Tachomag-International Space Station spectromagnetograph, which when measuring all components of the Stokes vector in selected spectral lines would have the necessary resolution and accuracy as well as speed for studying the dynamics of fast processes in the solar photosphere. **Method.** The paper presents for the first time a polarization analyzer for a space solar magnetograph, which operates on the principle of simultaneous acquisition of data in all polarizations. A characteristic difference of the device is not only the absence of traditional polarization modulators in the composition, but also rather small overall and weight characteristics, which is important specifically for space devices. **Main results.** It is shown that even in the space version a parallel polarization analyzer provides spectrum imaging in various polarizations with the required angular resolution of 0.35" according to the Rayleigh criterion in a field of view of 5' and a spectral resolution of 30 mÅ in the range of 2.52 Å, which corresponds to the characteristics of the solar optical telescope and spectrograph of the Tachomag-International Space Station spectromagnetograph. **Practical significance.** The development of the Tachomag-International Space Station spectromagnetograph will help in solving urgent problems of solar and plasma physics and will create a reserve for preparing for more complex missions related to solar research from close distances.

Keywords: solar magnetograph, parallel type polarization analyzer, Stokes parameters, calibration, aberration compensation

Acknowledgment: the work was carried out within the framework of the Federal Space Program at the expense of the state contract "ISS (Operation) — Operation-3" and was supported by the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation (Project No. 0030-2021-0015).

For citation: Kozhevatov I.E., Rudenchik E.A., Silin D.E., Stukachev S.E., Kulikova E.Kh. Optical radiation polarization analyzer for Takhomag-International Space Station space-based spectromagnetograph [In Russian] // Opticheskii Zhurnal. 2023. V. 90. № 6. P. 38–49. <http://doi.org/10.17586/1023-5086-2023-90-06-38-49>

OCIS codes: 120.5410, 350.1260, 350.6090, 220.4830, 220.1000.

ВВЕДЕНИЕ

Важность исследований солнечных магнитных полей для солнечной и плазменной физики хорошо известна [1, 2]. Солнечные магнитографы входят в состав аппаратуры большинства космических проектов, посвящённых экспериментальным исследованиям Солнца [3, 4]. Наиболее актуальными на сегодняшний день являются исследования тонкой структуры магнитных полей солнечной фотосферы, находящейся за пределами разрешения современных солнечных телескопов.

Большие надежды в решении этой задачи возлагаются на создание солнечных телескопов большой апертуры с применением технологий адаптивной оптики [5, 6], а также на исследования магнитных полей с близких от Солнца расстояний [7]. Такой космический проект существует и в России [8, 9]. Одной из целей разработки магнитографа «Тахомаг-МКС» является решение задач подготовки к более сложным космическим миссиям, связанным с исследованиями Солнца с близких расстояний.

Спектрально-поляризационный эффект, лежащий в основе работы солнечных магнитографов, определяет обязательное наличие в их составе как минимум трёх приборов: солнечного телескопа, спектрального устройства и анализатора поляризации. Что касается схем телескопа и спектрографа в составе «Тахомаг-МКС» [10, 11], в них есть много общих признаков с предшествующими аналогичными разработками [12], в том числе и космическими [13]. В меньшей степени это относится к представленному в данной статье анализатору поляризации так называемого «параллельного типа». Схема такого анализатора апробирована авторами относительно недавно на наземном варианте солнечного магнитографа ИЗМИРАН [12]. Вследствие этого, такие анализаторы широкого применения в мировой практике пока ещё не нашли.

Целью разработки являлось создание космического варианта анализатора поляризации параллельного типа для солнечного спектромагнитографа «Тахомаг-МКС», предполагаемого к установке на борту Международной космической станции (МКС).

Представляемая статья включает в себя следующие разделы:

1. Мотивы разработки анализаторов поляризации параллельного типа.
2. Общее описание оптической схемы.
3. Описание составных элементов и узлов.
4. Проблемные вопросы калибровки анализаторов поляризации параллельного типа.
5. Заключение и выводы.

1. МОТИВЫ РАЗРАБОТКИ АНАЛИЗАТОРОВ ПОЛЯРИЗАЦИИ ПАРАЛЛЕЛЬНОГО ТИПА

Кратко отметим мотивы ухода от традиционных схем анализаторов поляризации, которые, как известно, базируются на «последовательном» получение компонентов вектора поляризации излучения.

Неоднократно отмечалось, что в традиционных магнитографах Бэбкока с использованием одноэлементных приёмников (фотоэлектронных умножителей) для получения карт магнитных полей требуется гораздо больше времени, чем это допустимо для исследования динамики быстро протекающих вспышечных процессов. Последовательный перебор исследуемых точек для получения карт магнитных полей в солнечной фотосфере не только увеличивает время измерений, но и требует использования специальных, как правило, механических сканирующих устройств, работа которых приводит к дополнительным ошибкам при получении наблюдательных данных.

С изобретением матричных приёмников излучения и началом их использования в астрофизических исследованиях появилась возмож-

ность существенного увеличения быстродействия солнечных магнитографов. Современные фотоприёмные устройства с мегапиксельными матрицами дают практически неограниченную техническую возможность использования фактора параллельности измерений протяжённых источников и тем самым позволяют сократить время измерений. Отметим, что принцип параллельности (одновременности) получения данных по координатам источника к настоящему времени уже успешно используется и привёл к существенному сокращению времени получения данных [13]. Однако потенциал возможностей параллельных измерений пока ещё до конца не исчерпан, поскольку сам анализ поляризации излучения в современных солнечных магнитографах по-прежнему производится последовательным путём. Процесс получения полного вектора поляризации в точках изображения источника разбивается на ряд отдельных измерений, в каждом из которых определяется только один из его четырёх компонентов. Акту непосредственной регистрации каждой компоненты вектора предшествует смена состояния анализатора поляризации. Для этого в схему анализатора вводятся элементы (механические

или электрооптические), синхронно управляемые непосредственно во время эксперимента.

Не до конца используемый потенциал матричных приёмников для получения максимального быстродействия солнечных магнитографов потребовал разработки анализатора поляризации параллельного типа с тем, чтобы все компоненты вектора поляризации определялись одновременно.

2. ОБЩЕЕ ОПИСАНИЕ ОПТИЧЕСКОЙ СХЕМЫ

На рис. 1 представлена принципиальная оптическая схема анализатора поляризации параллельного типа. Она содержит входную щель D_2 , коллиматор K , светофильтр BS , две фазовые (четвертьволновые) пластины P_1 и P_2 , поляризационный расщепитель PS , выходной объектив O и матричный фотоприёмник PD .

Входная щель анализатора поляризации D_2 является одновременно и выходной щелью дифракционного спектрографа. Она служит для выделения из спектра излучения интервала длин волн, содержащего выбранные для анализа две фотосферные магнитоактивные

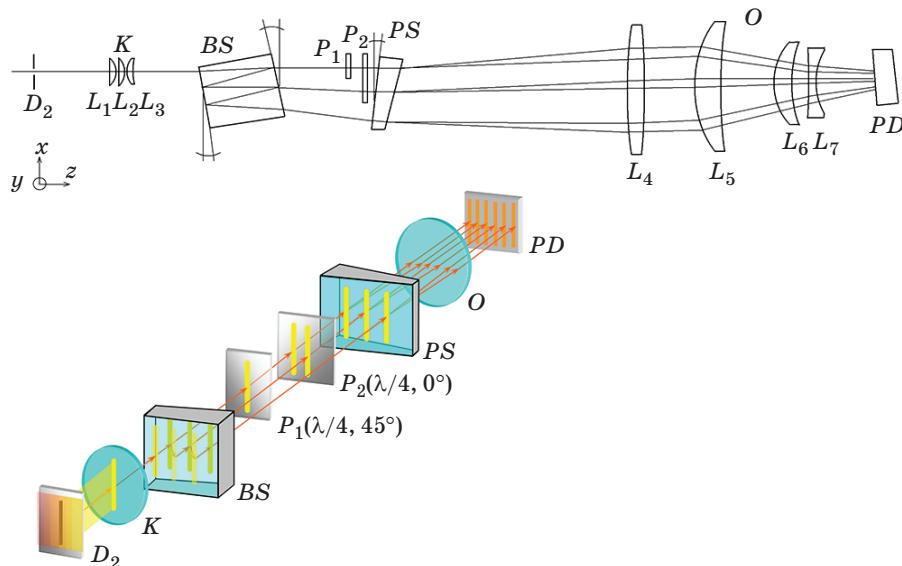


Рис. 1. Принципиальная оптическая схема анализатора поляризации параллельного типа. D_2 — входная щель, K — коллиматор, BS — светофильтр, P_1 и P_2 — фазовые (четвертьволновые) пластины, PS — поляризационный расщепитель, O — выходной объектив, PD — матричный фотоприёмник

Fig. 1. Schematic optical diagram of a parallel-type polarization analyzer. D_2 — entrance slit, K — collimator, BS — beam splitter, P_1 and P_2 — phase (quarter-wave) plates, PS — polarization splitter, O — output objective, PD — photodetector array

линии нейтрального железа FeI: $\lambda = 6301,5 \text{ \AA}$ и $\lambda = 6302,5 \text{ \AA}$. Ширина щели рассчитана так, чтобы анализируемый спектральный интервал составлял приблизительно $2,5 \text{ \AA}$, что позволяет пропускать для анализа обе рабочие линии магнитографа вместе с их крыльями.

Коллиматор K служит для преобразования изображения спектра на входной щели анализатора поляризации в веер параллельных пучков. В результате в рассматриваемом варианте схемы все функциональные элементы кроме входной щели и выходной приёмной камеры располагаются в параллельных лучах или в так называемой области, сопряжённой по Фурье к плоскости изображения спектра.

За коллиматором K располагается пространственно-угловая светоделитель BS , выполненный в виде призмы. Его назначением является трёхкратное мультиплексирование всех падающих на него лучей. Одним из свойств светоделителя является способность пространственного разделения пучков на величину, достаточную, чтобы впоследствии каждый из трёх пучков прошёл через свою комбинацию поляризационных элементов. Кроме того, благодаря наличию клина между отражающими гранями призмы, каждый из трёх пучков на выходе расщепителя приобретает дополнительный угол. Величина этого угла выбирается так, чтобы в фокальной плоскости выходного объектива O создавались неперекрывающиеся изображения спектра.

Назначением комбинации поляризационных элементов, состоящей из двух фазовых четвертьволновых пластин P_1 и P_2 и анализатора линейной поляризации (поляризационного расщепителя) PS , является одновременное получение всех составляющих вектора Стокса, описывающих состояние поляризации излучения.

Первый пучок, проходящий через светоделитель без отражений, проходит последовательно две четвертьволновые пластины P_1 и P_2 . Второй пучок, испытав два отражения в светоделителе, проходит через одну четвертьволновую пластинку P_1 , а третий пучок после четырёх отражений проходит прямо на поляризационный расщепитель. Направление поляризационных осей второй четвертьволновой пластинки P_2 совпадает с направлением осей системы координат. Направление поляризационных осей первой четвертьволновой

пластиинки P_1 повернуто относительно второй на угол 45° по часовой стрелке по ходу лучей в плоскости XY .

Набор четвертьволновых пластинок, используемый в схеме, является типичным для современных анализаторов поляризации. Отличием является только порядок его применения. В данном анализаторе требуемые комбинации поляризационных элементов используются одновременно, тогда как в традиционных схемах они работают попаременно. При этом смена комбинаций в традиционных схемах производится по внешним сигналам управления анализатором поляризации. В данной схеме управление состоянием анализатора поляризации не требуется.

Назначением поляризационного расщепителя PS является разделение пучков по признаку наличия в них составляющих линейной поляризации. Он представляет собой поляризационный (кристаллический) светоделительный элемент, из которого лучи с ортогональной линейной поляризацией выходят под углом относительно друг друга. Величина этого угла рассчитана так, чтобы изображения спектров в фокальной плоскости выходного объектива O располагались на минимальных расстояниях, исключающих, тем не менее, их взаимное перекрытие. На рис. 1 направление поляризации обычной волны соответствует направлению оси y , а необычной — оси x .

Выходной объектив O и матричный фотоприёмник PD предназначены для формирования и регистрации шести изображений спектра на выходе анализатора поляризации в шести различных комбинациях поляризаций. Поскольку все рабочие поверхности оптических элементов, расположенных за коллиматором K , являются плоскими, то сформированные им пучки остаются параллельными. В результате все шесть пучков на выходе поляризационного расщепителя PS фокусируются в фокальной плоскости объектива O , образуя на плоскости матрицы фотоприёмника 6 изображений спектра.

Комбинация из двух фокусирующих систем: коллиматора K и объектива O позволяет согласовать масштабы изображения спектра на выходе спектрографа с размерами используемой матрицы фотоприёмника PD .

Значения интенсивности I_j , $j = 1\dots6$, в каждом из 6 пучков лучей при идеальном исполнении

нении четвертьволновых пластиночек будут описываться следующими выражениями:

$$I_1 = \frac{1}{2}(J + Q), \quad (1)$$

$$I_2 = \frac{1}{2}(J - Q), \quad (2)$$

$$I_3 = \frac{1}{2}(J + V), \quad (3)$$

$$I_4 = \frac{1}{2}(J - V), \quad (4)$$

$$I_5 = \frac{1}{2}(J + U), \quad (5)$$

$$I_6 = \frac{1}{2}(J - U). \quad (6)$$

Здесь J, Q, U, V — параметры Стокса в соответствии с общепринятыми обозначениями.

Известно, что для вычисления четырёх параметров Стокса достаточно четырёх независимых линейных уравнений. Тем не менее, для получения параметров, определяющих вектор магнитного поля, предпочтительней иметь шесть вышеприведённых вариантов. В этом случае три наиболее важных параметра Стокса (Q, V, U) могут быть получены из соотношений (1)–(6) путём соответствующих вычитаний. Это в свою очередь позволяет эффективно исключить из конечных результатов любые возможные аддитивные погрешности, обусловленные помехами и шумами. Такой способ уменьшения погрешностей аналогичен модуляционному методу борьбы с шумами, широко применяемому при последовательном анализе.

3. ОПИСАНИЕ СОСТАВНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ И УЗЛОВ

Несмотря на относительную простоту оптической схемы анализатора поляризации (АП) параллельного типа, выбор конкретных параметров её составных элементов и узлов представляет собой серьёзную задачу. Как уже отмечено выше, задачей оптической схемы АП является формирование на матрице фотоприёмника шести пространственно разнесённых изображений входной щели АП, соответству-

ющих разным поляризационным составляющим солнечного излучения. При этом, как поляризационные искажения, так и геометрические aberrации, вносимые элементами схемы, должны быть минимальными. Иными словами, пространственное и спектральное разрешение, обеспеченные солнечным оптическим телескопом и дифракционным спектрографом, должны быть сохранены на выходе АП. Даные условия должны быть выполнены при соблюдении жёстких ограничений на габариты прибора — при выбранной компоновке спектромагнитографа «Тахомаг-МКС» длина анализатора поляризации должна составлять не более 500 мм.

Согласно характеристикам дифракционного спектрографа [11] ширина входной щели АП, соответствующая спектральной ширине $2,52 \text{ \AA}$, составляет 1,11 мм. Её высота при этом определяется угловым рабочим полем солнечного телескопа [10] и равна 12 мм.

В качестве матричного фотоприёмника PD предполагается использовать CMOS камеру с матрицей Gpixel GSENSE400, имеющей разрешение 2048×2048 пикселов, размер пикселя составляет $11 \times 11 \text{ мкм}$.

Процедура расчёта параметров АП заключалась в следующем. Исходя из известных размеров входной щели АП и матрицы фотоприёмника, выбирался коэффициент увеличения оптической системы. Затем определялись параметры светоделителя BS и поляризационного расщепителя PS : углы при вершинах, толщина, углы наклона относительно оптической оси АП. При этих расчётах коллиматор и выходной объектив АП считались идеальными линзами, обеспечивающими выбранный ранее коэффициент увеличения. После этого путём решения задачи минимизации геометрических aberrаций изображения осуществлялся численный расчёт параметров линз коллиматора K и выходного объектива O при заданном коэффициенте увеличения, а также параметрах светоделителя и поляризационного расщепителя.

Коэффициент увеличения оптической схемы АП должен быть таким, чтобы все шесть изображений входной щели АП попадали на матрицу фотоприёмника с учётом промежутков между ними. При этом поверхность матрицы должна использоваться максимально эффективно, и конечный размер элементов

матрицы не должен ограничивать пространственное и спектральное разрешения, обеспечиваемые спектромагнитографом. Исходя из этих требований, был выбран коэффициент увеличения $K = 2$.

Конструкция светоделителя BS рассчитана на получение трёх разнесённых в пространстве максимально идентичных пучков с минимальными искажениями исходной поляризации. Передняя грань светоделителя (за исключением входного окна) имеет отражающее покрытие с $R = 1$. Задняя грань на первой трети длины имеет покрытие с коэффициентом отражения $R = 0,67$, на второй трети длины имеет покрытие с коэффициентом отражения $R = 0,5$; последняя треть имеет просветляющее покрытие. На рис. 2 представлена принципиальная конструкция светоделителя и его ориентация относительно системы координат анализатора поляризации.

Минимальное расстояние между передней и задней гранями светоделителя составляет 39,5 мм, угол между ними равен $1,15^\circ$. Такое сочетание параметров позволяет при относительно небольших габаритах светоделителя эффективно развести внутри него световые пучки, соответствующие разным переотражениям от его граней, и, соответственно, вывести их через участки задней грани, имеющие разные коэффициенты отражения.

Передняя грань светоделителя BS расположена под углом $6,87^\circ$ к оптической оси. Этот угол является компромиссным для получения достаточно разнесённых пучков при мини-

мальном искажении поляризационных характеристик излучения. Отражающие слои обеспечивают изотропные по поляризации характеристики светоделителя в полосе $\pm 200\text{ \AA}$. Следует отметить, что последующая калибровка анализатора поляризации даёт возможность учесть неидентичность лучей в пучках и искажения поляризационных свойств. В то же время вышеупомянутые требования не могут быть излишними.

Четвертьволновые пластины, входящие в состав анализатора поляризации, должны быть выполнены из кристаллического кварца как элементы «нулевых порядков», что определяет их широкополосность и высокую светосилу. Для предотвращения возникновения бликов от рабочих граней пластин их поверхности тщательно просветлены. Это важно в целях уменьшения интерференционных эффектов, поскольку рабочие грани пластин параллельны и могут возникнуть условия для многолучевой интерференции.

Поляризационный расщепитель PS , являющийся анализатором линейной поляризации, должен быть изготовлен из исландского шпата. Конструкция расщепителя представлена на рис. 3. Оптическая ось кристалла направлена под углом $\theta_{PR} = 15^\circ$ к передней грани расщепителя, вторая грань имеет угол 10° с передней гранью. Такая конструкция расщепителя обеспечивает разведение пучков с ортогональными линейными поляризациями на угол, составляющий приблизительно $1,6^\circ$.

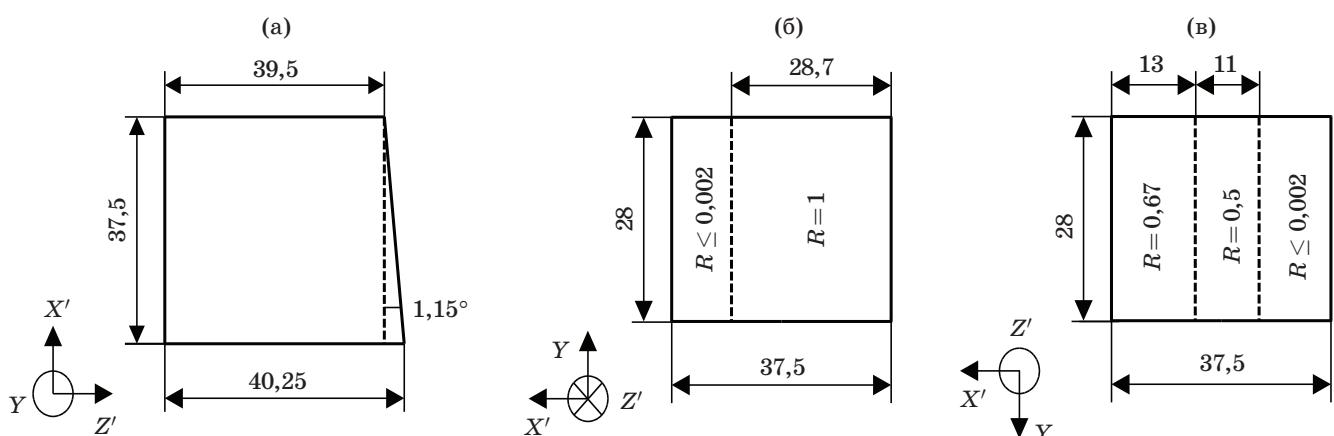


Рис. 2. Пространственный светоделитель BS . а) Вид сверху, б) вид со стороны передней грани, в) вид со стороны задней грани

Fig. 2. Spatial beam splitter BS. (a) Top view, б) view from the front side, в) view from the rear side

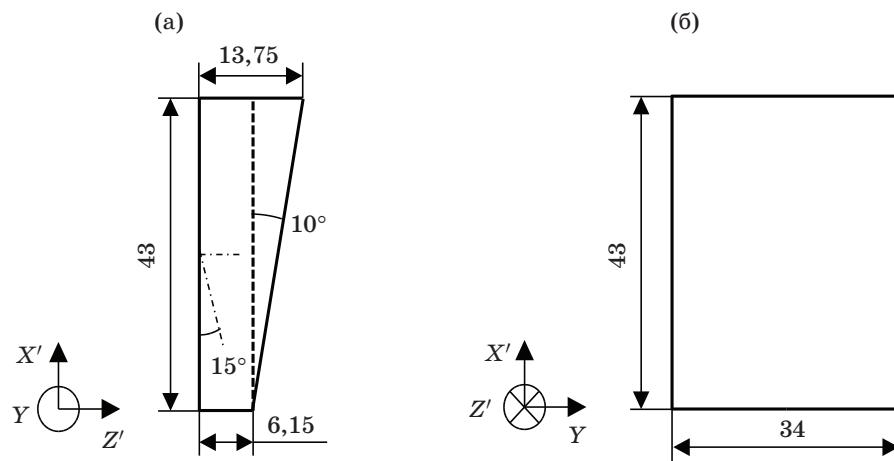


Рис. 3. Конструкция поляризационного расщепителя *PS*. а) Вид сверху, б) вид со стороны передней грани
Fig. 3. Design of the *PS* polarization splitter. (a) Top view, (b) view from the front side

Коллиматор и выходной объектив вместе представляют собой оптическую систему, которая переносит изображение входной щели анализатора поляризации в плоскость матричного фотоприёмника. В соответствии с характеристиками солнечного оптического телескопа [10] и спектрографа [11] спектромагнитографа «Тахомаг-МКС», анализатор поляризации должен обеспечивать вдоль щели угловое разрешение $0,35''$ по критерию Рэлея на поле зрения $5'$, а поперек щели — спектральное разрешение не хуже $30 \text{ м}\text{\AA}$ в диапазоне $2,52 \text{ \AA}$. Параметры линз объектива *O* и коллиматора *K* вычислялись как результат оптимизации в программе «Zemax-EE», аналогично тому, как это делалось для оптических схем солнечного телескопа и дифракционного спектрографа: были определены такие характеристики линз, чтобы aberrации каждого из шести изображений, построенных на матрице фотодетектора, были малы, по сравнению с дифракционным пределом разрешения оптической схемы прибора.

Минимизация aberrаций оптической схемы АП в программе «Zemax-EE» осуществлялась следующим образом. В качестве источника оптического излучения задавался набор точечных источников, равномерно распределённых по входной щели АП. При известных параметрах светофильтра и поляризационного расщепителя моделировался ход лучей через оптическую схему АП для каждого из шести изображений входной щели. После этого задавалась целевая функция, определяемая

значениями параметров Марешаля ΔW_{RMS} для всех изображений каждого из точечных источников. Далее запускалась процедура минимизации целевой функции, при помощи которой определялись итоговые параметры объектива и коллиматора АП.

В результате процедуры минимизации целевой функции были рассчитаны такие параметры линз коллиматора и объектива, при которых значения параметров Марешаля ΔW_{RMS} для каждого из изображений точек на входной щели не превышают $\lambda/40$, что соответствует рассеянию примерно 2% энергии из максимума изображения точки.

Данные aberrационные характеристики были получены при условии, что коллиматор состоит из трёх линз, а выходной объектив — из четырёх. Было установлено, что такое число линз является оптимальным: при меньшем количестве добиться достаточной минимизации aberrаций не удается, большее — не даёт существенной выгоды, при этом увеличивая массу и габариты АП. Рассчитанные фокусные расстояния коллиматора и выходного объектива составляют 56,5 мм и 113 мм соответственно.

Так же, как и при разработке оптических схем других узлов спектромагнитографа «Тахомаг-МКС» с помощью программы «ZEMAX-EE» были определены допуски на параметры оптической схемы анализатора поляризации, в пределах которых aberrации изображений, построенных на матричном фотоприёмнике, не превышают $\Delta W_{\text{RMS}} = \lambda/20$.

Оценивались допуски на общую и местную погрешности формы поверхностей линз коллиматора и объектива, децентрировку линз, точность позиционирования элементов схемы друг относительно друга. Полученные в результате сделанных оценок требования на точность изготовления и установки элементов оптической схемы АП не являются излишне строгими и могут быть удовлетворены при помощи современных технических средств. Таким образом, оптическая схема анализатора поляризации может быть изготовлена и настроена с точностью, достаточной для получения требуемых aberrационных характеристик каждого из изображений, построенных на матричном фотоприёмнике АП.

4. ПРОБЛЕМНЫЕ ВОПРОСЫ КАЛИБРОВОК АНАЛИЗАТОРОВ ПОЛЯРИЗАЦИИ ПАРАЛЛЕЛЬНОГО ТИПА

Было бы ошибочным считать, что многоканальные измерители параллельного типа, примером которых является представляемый анализатор поляризации, вообще не имеют недостатков. Во-первых, реализация многоканального принципа измерений требует достаточно сложной цифровой электроники, способной работать с многомерными массивами данных. Во времена первых солнечных магнитографов типа Бэбкока не было ни цифровой электроники для быстрой обработки двумерных массивов данных, ни средств для получения двумерных электронных изображений. В настоящее время проблемы регистрации и обработки больших массивов информации практически решены.

Основная проблема состоит в том, что от параллельно работающих каналов требуется метрологическая идентичность. Если такой идентичности нет, то разница данных об исследуемом объекте может быть вызвана не только его неоднородностью, но и неоднородностью характеристик используемого массива каналов. Следовательно, для получения требуемой точности необходимо, чтобы неоднородность параллельных измерительных каналов не превышала допустимые погрешности измерений. Существует путь улучшения абсолютной точности серийно выпускаемых приборов — это их калибровка (верификация или поверка). Для многоканальных приборов

калибровка преследует цель получения матрицы поправок, с помощью которой можно эффективно учесть и нивелировать имеющиеся неоднородности. Проблема калибровки магнитографов является не менее важной, чем проблема разработки и создания самой оптической системы [14–16]. Как правило, используется один из двух технических приёмов калибровок. Первый из них состоит в том, что для процедуры калибровки используется точечный источник. С помощью одного такого источника исследуются так называемые «отклики» всех параллельных каналов. Однако в этом случае требуется высокая временная стабильность источника. В противном случае временные флюктуации источника во время процедуры калибровки будут оцениваться как неоднородности параметров приёмных элементов. Сложным при такой процедуре является и сохранение идентичности свойств каналов при их последовательном сканировании.

Поэтому чаще применяются способы калибровки с использованием так называемых «эталонных источников», т.е. источников с однородным или априори известным распределением исследуемых параметров. Однако получение качественных эталонных источников часто бывает не менее сложной задачей, чем получение «эталонных» приёмных каналов.

На самом деле эти проблемы во многом взаимосвязаны. Имея эталонный источник с известным распределением характеристик, можно путём калибровок легко получить эталонное многоканальное измерительное устройство и, наоборот, при наличии многоканального однородного или откалиброванного измерительного устройства можно получить эталонный источник излучения.

Поскольку из этого замкнутого круга выход неочевиден, то констатируется наличие фундаментального ограничения точности измерений: максимальная точность измерений ограничена точностью изготовления эталонных средств (приёмников или источников). Это обстоятельство ставит достижимую точность измерений в жёсткую зависимость от достижений технологий. Как ни парадоксально, но данное ограничение иногда удается обойти. Это стало возможным относительно недавно, благодаря развитию методов решения обратных задач.

Одним из первых примеров успешного решения проблемы точных измерений при отсутствии точных эталонов является абсолютная калибровка эталонных пластин интерферометра Физо [17]. Разработанный авторами алгоритм калибровок позволил достичнуть точности измерений, которая более чем на порядок превышала точность изготовления эталонных пластин.

Позднее аналогичный приём был успешно использован при получении поляризационной матрицы наземного солнечного спектромагнитографа [18]. Как в первом, так и во втором случаях процедура калибровок осуществлялась без привлечения эталонов с однородными или с заранее установленными параметрами. Цель калибровочных процедур оставалась прежней — получение точных значений метеорологических параметров эталонов и повышение точности измерений. Однако методика калибровок была модифицирована так, чтобы проводимые при её реализации эксперименты позволяли получить невырожденную систему уравнений достаточной размерности, в которой в качестве неизвестных выступали не только параметры калибруемого измерителя, но и параметры источника. В результате решения этой системы уравнений однозначно определялись параметры и приёмного элемента, и используемого эталонного источника.

Потенциал улучшения точности калибровок с привлечением «технологий решения обратных задач» оказался настолько высоким, что позволил, не в ущерб требуемой точности, снизить требования к качеству изготовления многих элементов измерительных устройств. Такой подход в максимальной степени учитывался и при разработке новой схемы анализатора поляризации.

В разрабатываемой схеме анализатора поляризации для получения набора параметров Стокса в источнике (входная щель прибора) требуется регистрация интенсивностей в шести точках на выходе анализатора поляризации с использованием шести различных элементов (пикселов) матричного приёмника. Представленные выражения (1)–(6) для получения параметров Стокса только приблизительно отражают зависимости параметров поляризации от измеренных значений интенсивности. Они не учитывают многие факторы, включая технологические погрешности изготовления

элементов, аберрации оптики, неоднородность чувствительности элементов матрицы и т.д. Неидеальность поляризационной оптики может привести к перекрёстному проникновению сигналов из одних каналов в другие.

Тем не менее, это становится некритичным для точности измерений, поскольку истинная чувствительность каналов к разным поляризационным составляющим сигналов всё равно будет уточнена в результате калибровочной процедуры. Более того, доля искажений поляризации, вносимая каждым из элементов анализатора поляризации, принципиальной важности также не имеет. Она автоматически будет отражаться в общей поляризационной матрице прибора, учитывающей искажения во всей оптической «стопе» его элементов, начиная от входного окна телескопа и заканчивая матричным фотоприёмником.

5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ВЫВОДЫ

Разработан оптический анализатор поляризации для космического солнечного магнитографа. Эта составная часть солнечных магнитографов достаточно хорошо отработана для приборов наземного размещения. Сложность создания анализаторов поляризации для космических солнечных магнитографов определяется их конструкцией, связанной с последовательным принципом получения данных в разных поляризациях.

В работе впервые представлен анализатор поляризации для космического солнечного магнитографа, работающий по принципу одновременного получения данных во всех поляризациях. Дано обоснование концепции авторов, положенной в основу разработки анализатора поляризации. Характерным отличием прибора является не только отсутствие в составе традиционных модуляторов поляризации, но и достаточно малые габаритно-весовые характеристики, что важно именно для космических приборов. В работе показано, что наличие в приборе более сложного набора оптических элементов, чем в классических анализаторах поляризации, не приводит к значимому ухудшению аберрационных параметров прибора в целом. Показано, что даже в космическом исполнении анализатор поляризации обеспечивает построение требуемых по разрешению и точности изображений спектра в различных поляризациях.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Гибсон Э. Спокойное солнце. М.: Мир, 1977. 407 с.
2. Зирин Г. Солнечная атмосфера. М.: Мир, 1969. 504 с.
3. Tsuneta S., Ichimoto K., Katsukawa Y. et al. The Solar optical telescope for the hinode mission: An overview // Solar Physics. 2008. V. 249. P. 167–196. <https://doi.org/10.1007/s11207-008-9174-z>
4. Scherrer P.H., Schou J., Bush R.I. et al. The helioseismic and magnetic imager (HMI) investigation for the solar dynamics observatory (SDO) // Solar Physics. 2012. V. 275. P. 207–227. <https://doi.org/10.1007/s11207-011-9834-2>
5. Cao W., Gorceix N., Coulter R., Ahn K., Rimmele T.R., Goode P.R. Scientific instrumentation for the 1.6 m New Solar Telescope in Big Bear // Astron. Nachr. 2010. V. 331. № 6. P. 636–639. <https://doi.org/10.1002/asna.201011390>
6. Montilla I., Béchet C., Le Louarn M., Tallon M., Sánchez-Capuchino J., Collados Vera M. Multi-conjugate AO for the European Solar Telescope // Proceedings of the SPIE. Adaptive Optics Systems III. 2012. V. 8447. 84475H. <https://doi.org/10.1117/12.925744>
7. Müller D., St. Cyr O.C., Zouganelis I. et al. The Solar Orbiter mission. Science overview // Astronomy & Astrophysics. 2020. V. 642. A1. <https://doi.org/10.1051/0004-6361/202038467>
8. Oraevsky V.N., Galeev A.A., Kuznetsov V.D., Zelenyi L.M. Russian payload for “interhelioprobe” (“interhelios”) mission // Advances in Space Research. 2002. V. 29. P. 2041–2050. [https://doi.org/10.1016/S0273-1177\(02\)00149-7](https://doi.org/10.1016/S0273-1177(02)00149-7)
9. Kuznetsov V.D., Zelenyi L.M., Zimovets I.V. et al. The Sun and Heliosphere explorer — the interhelioprobe mission // Geomagnetism and Aeronomy. 2016. V. 56. P. 781–841. <https://doi.org/10.1134/S0016793216070124>
10. Кожеватов И.Е., Силин Д.Е., Стукачев С.Е. Солнечный оптический телескоп для спектромагнитографа космического базирования «Тахомаг-МКС» // Оптический журнал. 2021. Т. 88. № 9. С. 52–62. <https://doi.org/10.17586/1023-5086-2021-88-09-52-62>
11. Кожеватов И.Е., Руденчик Е.А., Силин Д.Е., Стукачев С.Е., Куликова Е.Х. Оптический спектрограф для спектромагнитографа космического базирования «Тахомаг-МКС» // Оптический журнал. 2022. Т. 89. № 7. С. 59–71. <https://doi.org/10.17586/1023-5086-2022-89-07-59-71>
12. Кожеватов И.Е., Иошпа Б.А., Обридко В.Н., Руденчик Е.А., Куликова Е.Х. Вторая версия солнечного спектромагнитографа ИЗМИРАН. Ч. 1. Конструкция прибора // Приборы и техника эксперимента. 2011. № 4. С. 130–138.
13. Lites B.W., Akin D.L., Card G. et al. The hinode spectro-polarimeter // Solar Physics. 2013. V. 283. P. 579–599. <https://doi.org/10.1007/s11207-012-0206-3>
14. Hagayard M.J., Kineke J.I. Improved method for calibrating filter vector magnetographs // Solar Physics. 1995. V. 158. P. 11–28. <https://doi.org/10.1007/BF00680832>
15. Varsik J.R. Calibration of the Big Bear Videomagnetograph // Solar Physics. 1995. V. 161. P. 207–228. <https://doi.org/10.1007/BF00732067>
16. Skumanich A., Lites B.W., Pillet V.M., Seargraves P. The calibration of the advanced stokes polarimeter // The Astrophysical Journal Supplement Series. 1997. V. 110. P. 357–380. <https://doi.org/10.1086/313004>

REFERENCES

1. Gibson E.G. The quiet Sun. Washington: National Aeronautics and Space Administration, 1973. 407 p.
2. Zirin H. The Solar atmosphere. Waltham: Blaisdell Publishing Company, 1966. 504 p.
3. Tsuneta S., Ichimoto K., Katsukawa Y. et al. The Solar Optical Telescope for the Hinode Mission: An Overview // Solar Physics. 2008. V. 249. P. 167–196. <https://doi.org/10.1007/s11207-008-9174-z>
4. Scherrer P.H., Schou J., Bush R.I. et al. The helioseismic and magnetic imager (HMI) investigation for the Solar Dynamics Observatory (SDO) // Solar Physics. 2012. V. 275. P. 207–227. <https://doi.org/10.1007/s11207-011-9834-2>
5. Cao W., Gorceix N., Coulter R., Ahn K., Rimmele T.R., Goode P.R. Scientific instrumentation for the 1.6 m New Solar Telescope in Big Bear // Astron. Nachr. 2010. V. 331. № 6. P. 636–639. <https://doi.org/10.1002/asna.201011390>
6. Montilla I., Béchet C., Le Louarn M., Tallon M., Sánchez-Capuchino J., Collados Vera M. Multi-conjugate AO for the European Solar Telescope // Proceedings of the SPIE. Adaptive Optics Systems III. 2012. V. 8447. 84475H. <https://doi.org/10.1117/12.925744>
7. Müller D., St. Cyr O.C., Zouganelis I. et al. The Solar Orbiter mission. Science overview // Astronomy & Astrophysics. 2020. V. 642. A1. <https://doi.org/10.1051/0004-6361/202038467>
8. Oraevsky V.N., Galeev A.A., Kuznetsov V.D., Zelenyi L.M. Russian payload for “interhelioprobe” (“interhelios”) mission // Advances in Space Research. 2002. V. 29. P. 2041–2050. [https://doi.org/10.1016/S0273-1177\(02\)00149-7](https://doi.org/10.1016/S0273-1177(02)00149-7)
9. Kuznetsov V.D., Zelenyi L.M., Zimovets I.V. et al. The Sun and Heliosphere Explorer — The Interhelioprobe Mission // Geomagnetism and Aeronomy. 2016. V. 56. P. 781–841. <https://doi.org/10.1134/S0016793216070124>
10. Кожеватов И.Е., Силин Д.Е., Стукачев С.Е. The solar optical telescope for the Takhomag-International Space Station space-based spectromagnetograph // Journal of Optical Technology. 2021. V. 88. P. 520–526. <https://doi.org/10.1364/JOT.88.000520>
11. Кожеватов И.Е., Руденчик Е.А., Силин Д.Е., Стукачев С.Е., Куликова Е.Х. Optical spectrograph for the Takhomag-International Space Station space-based spectromagnetograph // Journal of Optical Technology. 2022. V. 89. P. 409–417. <https://doi.org/10.1364/JOT.89.000409>
12. Кожеватов И.Е., Иошпа Б.А., Обридко В.Н., Руденчик Е.А., Куликова Е.Х. Second version of the IZMIRAN solar spectromagnetograph. Part I. Instrument design // Instruments and Experimental Techniques. 2011. V. 54. P. 568. <https://doi.org/10.1134/S0020441211040051>
13. Lites B.W., Akin D.L., Card G. et al. The hinode spectro-polarimeter // Solar Physics. 2013. V. 283. P. 579–599. <https://doi.org/10.1007/s11207-012-0206-3>
14. Hagayard M.J., Kineke J.I. Improved method for calibrating filter vector magnetographs // Solar Physics. 1995. V. 158. P. 11–28. <https://doi.org/10.1007/BF00680832>
15. Varsik J.R. Calibration of the Big Bear Videomagnetograph // Solar Physics. 1995. V. 161. P. 207–228. <https://doi.org/10.1007/BF00732067>
16. Skumanich A., Lites B.W., Pillet V.M., Seargraves P. The calibration of the advanced stokes polarimeter // The Astrophysical Journal Supplement Series. 1997. V. 110. P. 357–380. <https://doi.org/10.1086/313004>

17. Руденчик Е.А., Кожеватов И.Е., Черагин Н.П., Куликова Е.Х., Безрукова Е.Г. Метод абсолютной калибровки эталонных пластин для интерферометрического контроля поверхностей // Оптика и спектроскопия. 2001. Т. 90. № 2. С. 127–135.
18. Руденчик Е.А., Обридко В.Н., Кожеватов И.Е., Безрукова Е.Г. Вторая версия солнечного спектромагнитографа ИЗМИРАН. Ч. 2. Алгоритмы предварительной обработки данных // Приборы и техника эксперимента. 2011. № 4. С. 139–147.
17. Rudenchik E.A., Kozhevatov I.E., Cheragin N.P., Kulikova E.Kh., Bezrukova E.G. Method for absolute calibration of reference plates for interferometric inspection of surfaces // Optics and Spectroscopy. 2001. V. 90. P. 113–120. <https://doi.org/10.1134/1.1343555>
18. Rudenchik E.A., Obridko V.N., Kozhevatov I.E., Bezrukova E.G. Second version of the IZMIRAN solar spectromagnetograph. Part II. Algorithms for preliminary data processing // Instruments and Experimental Techniques. 2011. V. 54. P. 577. <https://doi.org/10.1134/S0020441211040063>

Авторы

Илья Емельянович Кожеватов — доктор физ.-мат. наук, старший научный сотрудник, заведующий лабораторией, Институт прикладной физики им. А.В. Гапонова-Грекова Российской академии наук, 603950, Нижний Новгород, Россия; <https://orcid.org/0000-0003-1169-7547>, kozh-ie@mail.ru

Елена Хусаиновна Куликова — инженер, Национальный исследовательский Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского, 603950, Нижний Новгород, Россия; <https://orcid.org/0000-0001-5183-2024>, kex-2010@mail.ru

Евгений Антонович Руденчик — канд. физ.-мат. наук, старший научный сотрудник, зав. сектором, Институт Земного магнетизма, ионосфера и распространения радиоволн им. Н.В. Пушкова Российской Академии наук, 108840, г. Троицк, Москва, Россия

Дмитрий Евгеньевич Силин — канд. физ.-мат. наук, зам. зав. отделом по научной работе, Институт прикладной физики им. А.В. Гапонова-Грекова Российской академии наук, 603950, Нижний Новгород, Россия; <https://orcid.org/0000-0001-5962-2080>, silindm@list.ru

Сергей Евгеньевич Стукачев — канд. физ.-мат. наук, научный сотрудник, Институт прикладной физики им. А.В. Гапонова-Грекова Российской академии наук, 603950, Нижний Новгород, Россия; <https://orcid.org/0000-0002-4307-5542>, stukachev@ipfran.ru

Статья поступила в редакцию 13.12.2022
Одобрена после рецензирования 03.02.2023
Принята к печати 27.04.2023

AUTHORS

Ilya E. Kozhevatov — Dr.Sc. in Physics and Mathematics, Senior Researcher, Head of Laboratory, A.V. Gaponov-Grekov Institute of Applied Physics of the Russian Academy of Sciences, 603950, Nizhny Novgorod, Russia; <https://orcid.org/0000-0003-1169-7547>, kozh-ie@mail.ru

Elena H. Kulikova — Engineer, Lobachevsky Nizhny Novgorod State University, 603950, Nizhny Novgorod, Russia; <https://orcid.org/0000-0001-5183-2024>, kex-2010@mail.ru

Evgeniy A. Rudenchik — PhD in Physics and Mathematics, Senior Researcher, Head of Sector, Pushkov Institute of Terrestrial Magnetism, Ionosphere and Radio Wave Propagation of the Russian Academy of Sciences, 108840, Troitsk, Moscow, Russia

Dmitry E. Silin — Phd in Physics and Mathematics, Deputy Head of Department for Scientific Work, A.V. Gaponov-Grekov Institute of Applied Physics of the Russian Academy of Sciences, 603950, Nizhny Novgorod, Russia; <https://orcid.org/0000-0001-5962-2080>, silindm@list.ru

Sergey E. Stukachev — PhD in Physics and Mathematics, Researcher, A.V. Gaponov-Grekov Institute of Applied Physics of the Russian Academy of Sciences, 603950, Nizhny Novgorod, Russia; <https://orcid.org/0000-0002-4307-5542>, stukachev@ipfran.ru

The article was submitted to the editorial office 13.12.2022
Approved after review 03.02.2023
Accepted for publication 27.04.2023