



# Бесконтактная система измерения геометрических параметров решеток ионных двигателей

П. С. Завьялов, Е. В. Власов, А. В. Белобородов, М. С. Кравченко, А. А. Гущина, Д. В. Скоков  
Конструкторско-технологический институт научного приборостроения СО РАН, г. Новосибирск, Россия

Обозначена проблема измерения важнейшего параметра, характеризующего работу ионного двигателя, зазора между экраном, ускоряющей и замедляющей сетками блока ионной оптики. Предложена измерительная система, реализующая теневой метод в параллельных лучах и позволяющая проводить измерения в вакуумной камере. Для снижения жестких требований к точности позиционирования объекта при измерениях значения параметра в системе используется телецентрический объектив. Система успешно прошла испытания, результаты измерений представлены в работе.

**Ключевые слова:** бесконтактные измерения, теневой метод, измерение геометрических параметров, решетки ионного двигателя, ионная оптика.

Статья получена: 29.09.2023

Статья принята: 24.11.2023

## ВВЕДЕНИЕ

Важнейшими параметрами ионного двигателя, влияющими на его работоспособность и срок службы, являются зазоры между экраном, ускоряющей и замедляющей решетками блока ионной оптики. В процессе работы ионного двигателя зазоры изменяются за счет теплового расширения решеток, и возникает риск пробоя зазоров (или даже замыкания решеток), особенно в режимах высокого дифференциального нагрева, например, при запуске двигателя. Поэтому для правильной оценки рабочих параметров и срока службы двигателя, а также в процессе исследования новых мате-

# Non-Contact Measurement System for Geometric Parameters of Ion Thruster Grids

P. S. Zavialov, E. V. Vlasov, A. V. Beloborodov, M. S. Kravchenko, A. A. Gutschina, D. V. Skokov  
Design and Technology Institute of Scientific Instrumentation SB RAS, Novosibirsk, Russia

The most important parameter of an ion thruster, affecting its performance and service life, is the gap between the screen and the accelerating and decelerating grids of the ion optics unit. During operation of the ion thruster, the gap is changed due to the heating and thermal expansion of the grids. Awareness of this gap in the hot grid is necessary for adequate assessment of the ion thrust operating parameters and service life. The paper considers a measuring system based on the direct shadow parallel light method. To register the grid position, the pins protruding above the grid surface are placed on them. The image is recorded by a telecentric lens that lowers the requirements for positioning accuracy of the measurement object. The illumination unit and the image acquisition unit are placed in the pressure-tight housings that allow measurements to be performed in a vacuum chamber. The system has successfully passed the tests, the measurement results are given in the paper.

**Key words:** non-contact measurements, shadow method, measurement of geometric parameters, ion thruster grids, ion optics.

Article received: 29.09.2023

Article accepted: 24.11.2023

## INTRODUCTION

The most important parameters of an ion thruster that affect its performance and service life are the



риалов для изготовления решеток, необходимо динамическое измерение указанных зазоров непосредственно в работающем двигателе.

Задача измерения расстояния между решетками уже решалась ранее. Так, в работе [1] предложено проводить измерение визуально путем наблюдения отметок (маркеров) на отградуированных металлических штырьках, закрепленных на экранной решетке и проходящих сквозь отверстия ускоряющей решетки. Однако штырьки были металлическими, т.е. находились под тем же напряжением, что и решетка, и потому генерация пучка двигателем с установленными штырьками была невозможна. В работе [2] также использовались металлические штырьки, а измерительный прибор располагался на выходе ионной оптики.

В работе [3] измерительный прибор был расположен под углом относительно нормали к решетке двигателя. Измерение выполнялось с помощью двух длиннофокусных микроскопов, рассматривающих отверстия в противоположных сторонах решеток. Однако для учета радиального движения требовалось проводить два измерения, что значительно усложняло метод. Вдобавок при смещении микроскопа относительно нормали снижается разрешение, а поскольку отверстия в ускоряющей решетке значительно меньше отверстий в экранной решетке, и зазор между решетками мал, разрешение оказывается достаточным только в случае размещения измерительного микроскопа в шлейфе генерируемого потока ионов.

В публикации [4] авторами описывается простая методика динамического измерения зазора между горячими решетками ионного двигателя, работающего с генерацией потока ионов. Зазор между решетками измерялся в центре узла ионной оптики с помощью длиннофокусного микроскопа. Микроскоп был сфокусирован на штифте из оксида алюминия, который был механически прикреплен к экранной решетке и выступал через центральное отверстие ускоряющей решетки. Этими же авторами позднее опубликована работа [5]. Изменилось освещение объекта: добавился светодиод на объективе микроскопа. Улучшена конструкция крепления штырька: вместо 8 отверстий ускоряющей решетки приспособление перекрывает только 4. В работах [6, 7] используется тот же метод видеометрии с помощью длиннофокусного микроскопа. Однако в данном случае авторы расположили камеру в стороне от работающего двигателя. Конструкция штырьков выполнена таким образом, что он занимает одно отверстие решетки. Авторы располагают штырьки в каждой из исследу-

gaps between the screen and the accelerating and decelerating grids of the ion optics unit. During operation of the ion thruster, the gaps are changed due to the thermal expansion of grids, thus leading to a risk of gap breakdown (or even fault of the grids), especially in the high differential heating modes, for example, when the thruster is started. Therefore, for an adequate assessment of the thruster operating parameters and service life, as well as when studying new materials for the grid production, it is necessary to dynamically measure the specified gaps directly in the running thruster.

The problem of measuring distance between the grids has already been solved previously. Thus, in paper [1] it was proposed to perform the visual measurements by observing the marks (markers) on the graduated metal pins mounted on the screen grid and passing through the holes of the accelerating grid. However, the pins were metal, i.e. they were under the same voltage as the grid, and therefore the beam generation by the thruster with installed pins was impossible. In paper [2], the metal pins were also used, and the measuring device was located at the output of the ion optics.

In paper [3], the device was located at an angle relative to the normal to the thruster grid. The measurement was performed using two long-focal microscopes observing the holes in opposite sides of the grids. However, two measurements were required to register the radial motion that led to the significant method complication. In addition, when the microscope was displaced relative to the normal, the resolution was decreased. Since the holes in the accelerating grid were much smaller than the holes in the screen grid, and the gap between the grids was rather small, the resolution was sufficient only if the measuring microscope was placed in the plume of the generated ion flow.

In publication [4], the authors described a simple dynamical measurement method for the gap between hot grids of an ion thruster operating with the ion flow generation. The gap between the grids was measured at the center of the ion optics unit using a long-focal microscope. The microscope was focused on an aluminum oxide pin that was mechanically attached to the screen grid and protruded through the central hole of the accelerating grid. The same authors have published the paper [5] a little bit later. The object illumination has been changed, and an LED has been added to the microscope objective. The pin fastening design has been improved: the device has covered only 4 holes in the accelerating grid instead of 8 holes. In papers [6, 7], the same videometrical



емых решеток, тем самым одновременно получая информацию о положении всех трех решеток.

В данной работе предложено использовать теневой метод контроля, что отличает предлагаемую систему от подавляющего большинства иных систем измерения зазора между решетками ионного двигателя, основанных на регистрации отраженного от объекта измерения света. Предполагается, что это позволит достичь более высокой точности за счет того факта, что расстояние, на котором может находиться измеряемый объект, слабо влияет на точность измерений. Кроме того, появится возможность вывести элементы измерительной системы из ионного пучка, обеспечив для нее приемлемые условия работы. Разместив измерительную систему в герметичном боксе, можно обеспечить проведение измерений прямо в процессе работы ионного двигателя внутри термовакuumной камеры.

### СХЕМА ИЗМЕРЕНИЯ

Предлагаемая авторами схема измерения на основе теневого метода в параллельных лучах [8], приведена на рис. 1. Для регистрации положения решеток на них размещаются пины (штырьки) 1 из алюмооксидной керамики, выступающие над поверхностью решетки или решеток, в случае если используется не одна решетка, а несколько. Расстояние между решетками определяется косвенным способом – путем определения положения этих пинов. Алюмооксидная керамика является диэлектриком и выдерживает температуру работы ионного двигателя (1000 °C), имея при этом минимальный коэффициент температурного расширения, что позволит проводить измерения положения решеток при работающем двигателе.

Измерительная система (далее СБИГП – Система бесконтактного измерения геометрических параметров) содержит два блока: осветитель и регистратор. Пины освещаются импульсным светодиодом 2, а изображение их теневых проекций, сформированное телецентрическим объективом 3, регистрируется цифровой камерой 4. При этом импульс света от светодиода синхронизирован с затвором камеры.

В качестве источника света в осветителе используется красный светодиод, а в приемной части присутствует согласованный с ним полосовой фильтр 5 ( $\lambda=650\pm 20$  нм). Ar или Xe плазма реактивной струи не содержит линий поглощения красного света, а ее собственное излучение лежит в основном в синей части спектра и подавляется фильтром, что позволяет избавиться от возможных помех при измерениях.

method was used with application of a long-focal microscope. However, in this case, the authors positioned the camera away from the running thruster. The pin design was prepared in such a way that it occupied one hole in the grid. The authors placed the pins in each of the grids under study, thereby simultaneously obtaining information about the positions of all three grids.

The authors of this paper propose to use the shadow control method, in contrast to the vast majority of other systems based on the light reflected from the measurement object, to measure the gap between the ion thruster grids. It is expected that this approach will allow achieving higher accuracy due to the fact that the distance at which the measured object may be located has little effect on the measurement accuracy. In addition, it will be possible to remove the measurement system elements from the ion beam, providing it with the acceptable operating conditions. Having placed the measuring system in a sealed compartment, it is possible to ensure that the measurements are performed while the ion thruster is operated inside a thermal vacuum chamber.

### MEASUREMENT PLAN

The measurement plan proposed by the authors and based on the direct shadow parallel light method [8] is shown in Fig. 1.

To register the grid positions, the pins 1 made of aluminum-oxide ceramics are placed on them while protruding above the surface of the grid or grids, if there are several of them. The distance between the grids is determined indirectly, namely by establishing the position of these pins. Aluminum oxide ceramics is a dielectric medium and can withstand the operating temperature of the ion thruster (1000 °C), while having a minimum thermal expansion coefficient that will allow measurements of the grid positions while the thruster is running.

The measurement system (hereinafter referred to as the GPNMS, namely the geometric parameter non-contact measurement system) consists of two units: an illuminator and a recorder. The pins are illuminated by a pulsed LED 2, and the image of their shadow projections generated by a telecentric lens 3, is recorded by a digital camera 4. In this case, the light pulse from the LED is synchronized with the camera shutter.

The illuminator uses a red LED as a light source, and the receiving part contains a bandpass filter 5 ( $\lambda=650\pm 20$  nm) matched. The Ar or Xe jet stream plasma does not contain the red light absorption lines, and its own radiation lies mainly in the blue spectrum

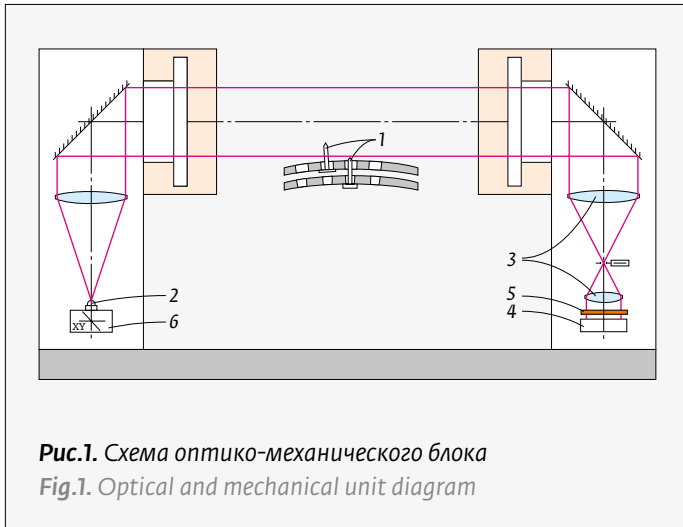


Рис.1. Схема оптико-механического блока  
Fig.1. Optical and mechanical unit diagram

Двухкоординатная подвижка с шаговым приводом 6 используется для компенсации температурных уводов основания и осуществляет подстройку положения светодиода так, чтобы достигался максимум освещенности на цифровой камере.

### РАСЧЕТ ТЕЛЕЦЕНТРИЧЕСКОГО ОБЪЕКТИВА И ЕГО КАЛИБРОВКА

Для вынесения СБИГП из пламени работающего ионного двигателя необходимо выполнять расчет телецентрического объектива с увеличенным передним рабочим отрезком. Выбор объектива такого типа позволяет снизить требования к точности позиционирования объекта измерения [9]. Расчет телецентрического объектива проводился в программном пакете Zemax путем оптимизации характеристик первоначальной оптической схемы для достижения требуемого качества изображения, обеспечивающего необходимую точность измерений. При заданной погрешности измерений 50 мкм необходимо, чтобы телецентричность хода лучей была не хуже 0,05%, а дисторсия изображения не более 0,5%. На рис. 2 представлена оптическая схема рассчитанного объектива с ходом лучей и его абберрационные характеристики. Оптические характеристики рассчитанного объектива приведены в таблице.

Из анализа представленных данных видно, что объектив имеет увеличенный передний рабочий отрезок, что позволит располагать его на необходимом расстоянии от объекта. Поле зрения составляет 40 мм, глубина резкости достигает 100 мм. Диапазон длин волн смещен в красную область спектра. Объектив имеет малую остаточную нетелецентричность (0,047°) и малую дисторсию (менее 0,2%), что обеспечит необходимую точность измерений.

portion and is suppressed by a filter that eliminates possible interference in the measurements.

A two-axis adjustment with an intermittent drive 6 is used to compensate for temperature changes in the base and regulates the LED position in such a way that the maximum illumination on the digital camera is achieved.

### DESIGN OF A TELECENTRIC LENS AND ITS CALIBRATION

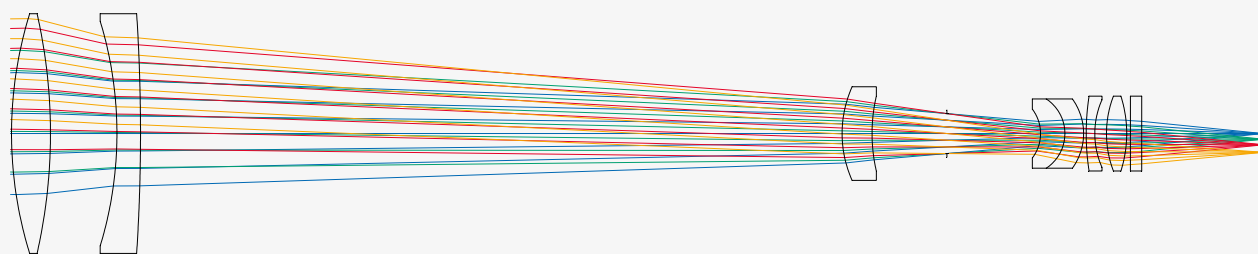
To remove the GPNMS from the flame of a running ion thruster, it is necessary to design a telecentric lens with an increased front flange focal distance. Selection of such a lens makes it possible to lower the requirements for positioning accuracy of the measurement object [9]. The telecentric lens was designed in the Zemax software package by optimizing the specifications of the initial optical circuit to achieve the required image quality, ensuring the required measurement accuracy. With a given measurement error of 50  $\mu\text{m}$ , the ray path telecentricity shall be no worse than 0.05%, and the image distortion shall be no more than 0.5%. Figure 2 shows the optical circuit of designed lens with the ray path and its aberration specifications. The optical performance of the designed lens is given in Table 1.

The given data shows that the lens has an increased front flange focal distance, allowing it to be used at the required distance from the object. The field of view is 40 mm, the depth of field reaches 100 mm. The wavelength range is shifted to the red region of the spectrum. The lens has low residual non-telecentricity (0.047°) and low distortion (less than 0.2%) that will ensure the required measurement accuracy.

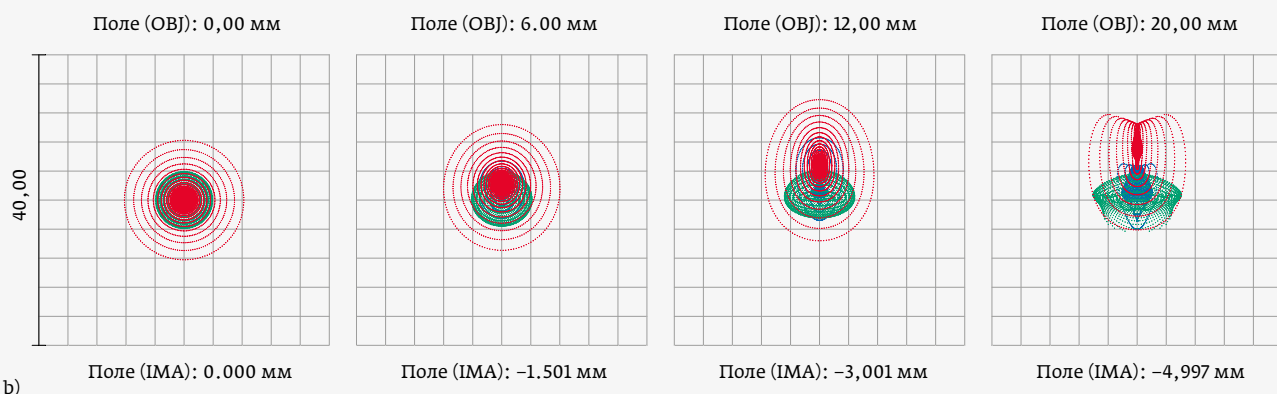
The residual aberrations and errors occurred at the assembly stage can be compensated during the GPNMS software calibration process on the basis of a mask work, on which a pattern in the form of holes in the square grid points is applied by a circular laser recording system CLWS-300C/M [10] based on the high-precision laser photolithographic method (about 30 nm) (Fig. 3a).

When calibrating on the basis of a mask work, the centers of mass in its image are used to determine the centers of circles, each of which is associated with a point on an ideal plane. The entire set of centers is divided into the triangles using the Delaunay triangulation. Each triangle in the image is related to an ideal triangle with an established shape and size. To adjust the position of any image point, it is enough to find the triangle containing this point and convert its coordinates from pixels to millimeters, using a conformal transformation.

a)



b)



c)

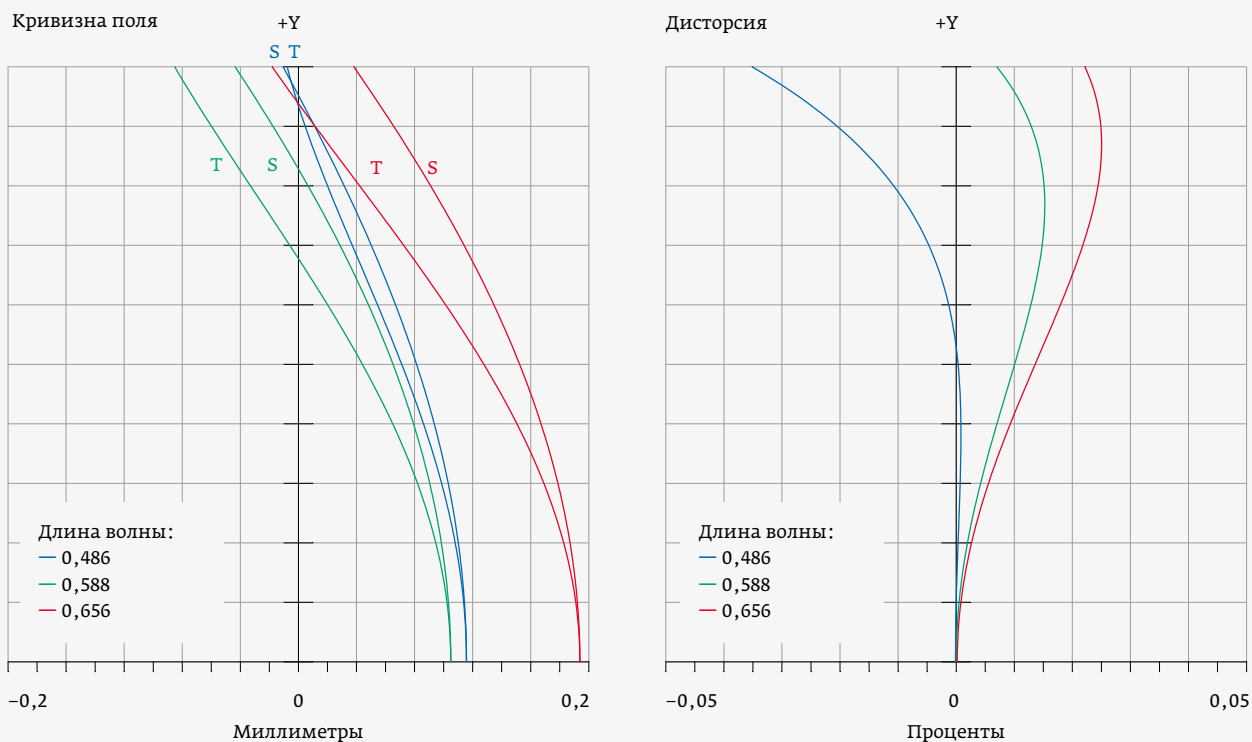


Рис. 2. Телецентрический объектив СБИГП: а) оптическая схема с ходом лучей, б) пятна рассеяния, в) кривизна поля и дисторсия (блины волн: 0,486, 0,588, 0,656 мкм)

Fig. 2. Telecentric lens of the GPNMS: a) optical circuit with the ray path, b) circles of confusion, c) curvature of field and distortion (wavelengths: 0.486, 0.588, 0.656  $\mu\text{m}$ )



Остаточные aberrации и погрешности, возникшие на этапе сборки, могут быть скомпенсированы в процессе программной калибровки СБИГП по фотошаблону. На фотошаблон методом лазерной фотолитографии нанесен рисунок в виде отверстий в узлах квадратной сетки (рис. 3а) круговой лазерной записывающей системой CLWS-300С/М [10], погрешность нанесения рисунка около 30 нм.

При калибровке по фотошаблону на его изображении по центрам масс определяются центры кружков, каждому из которых сопоставляется точка на идеальной плоскости. Весь набор центров разбивается на треугольники с помощью триангуляции Делоне: каждому треугольнику на изображении ставится в соответствие идеальный треугольник известной формы и размера. Для коррекции положения любой точки изображения достаточно найти содержащий эту точку треугольник и, выполнив конформное преобразование, перевести ее координаты из пикселей в миллиметры.

Другой возможный способ калибровки – это калибровка по теневому изображению цилиндрического образца известного диаметра (рис. 3б). В этом случае на изображении с субпиксельной точностью определяются границы тени, после чего вычисляется значение разрешения, которое в данной системе составило около 22 мкм/пиксел.

### СБИГП И ЕЕ ИСПЫТАНИЯ

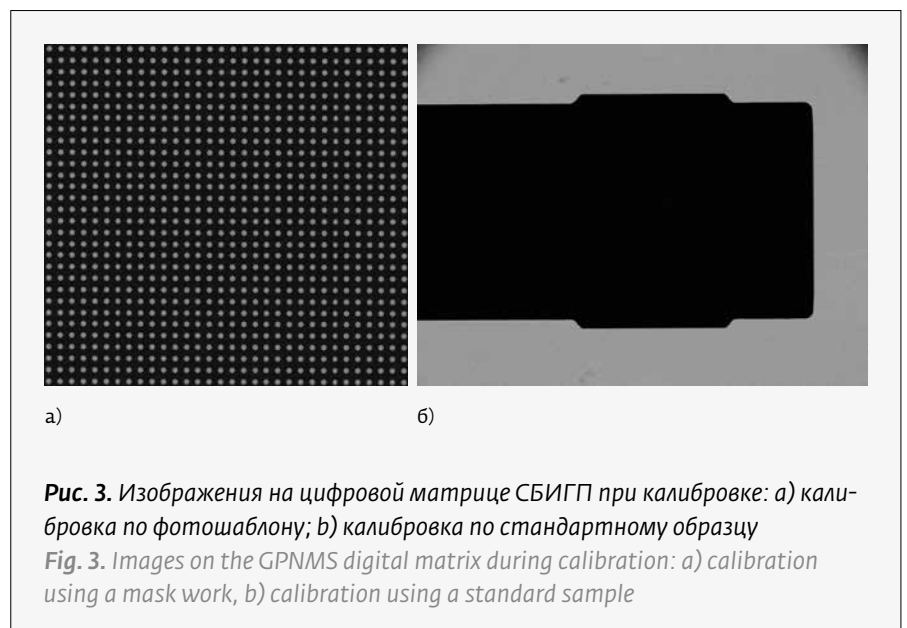
3D-модель созданной системы представлена на рис. 4, а ее фотография – на рис. 5. Система состоит из осветителя 1 и регистратора 2. Они устанавливаются на раму 3, а между ними размещается сборка решеток ионного двигателя 4. На каждую из трех решеток сборки устанавливаются пины 5. Всего на сборке предусмотрено пять мест установки групп из 3 пинов, общее число пинов – до 15.

Внутри герметичных кожухов, способных работать при внешнем вакууме  $10^{-4}$  Па и в диапазоне внешней температуры от  $-70$  °С до  $+120$  °С, с помощью теплового экрана и системы кондиционирования (радиаторов с водяным подогревом/охлаждением и вентилятора) создаются нормальные условия, необходимые для работы оптико-электронных бло-

**Таблица 1.** Оптические характеристики предлагаемого телецентрического объектива  
**Table 1.** Optical specifications of the proposed telecentric lens

Параметр объектива Parameter of the lens	Значение Value
Передний рабочий отрезок, мм Front flange focal distance, mm	$650 \pm 50$
Диапазон длин волн, нм Wavelength range, nm	610–660
Диаметр поля зрения, мм Diameter of the field of view, mm	40
Размер изображения, мм × мм Image dimensions, mm × mm	10 × 10
Нетелецентричность в пространстве предметов, ° Non-telecentricity in the object space, °	0,047
Дисторсия, % Distortion, %	0,2
Относительное отверстие Angular field	F/5

Another possible method is calibration using a shadow image of a cylindrical sample with an established diameter (Fig. 3b). In this case, the shadow boundaries are determined in the image with subpixel accuracy, after which the resolution value is calculated that is about 22  $\mu\text{m}/\text{pixel}$  in this system.



ков. Трубки для подачи теплоносителя системы кондиционирования и кабели связи аппаратуры с управляющим компьютером проложены в вакуумно-плотной трубке, выходящей за пределы термовакуумной камеры по трубе 7.

Для защиты оптических иллюминаторов осветителя и регистратора от оседания продуктов работы ионного двигателя перед ними устанавливаются защитные плоскопараллельные стеклянные пластины 6, которые могут быть легко демонтированы для очистки и установлены назад без использования уплотнений.

Осветитель формирует параллельный пучок для освещения одной из пяти групп пинов. Регистратор с помощью телецентрического объектива 8 фиксирует получающуюся теневую картину пинов на цифровой матрице 9 с разрешением 2048×2048 пикселей (рис. 6).

Осветитель и регистратор синхронно перемещаются с помощью шаговых приводов 10 (рис. 5) между позициями измерения, регистрируя все изображения в течение 1 минуты.

Для СБИГП разработано специальное программное обеспечение, в котором выполняются калибровка, измерения, просмотр предыдущих измерений. Реализована возможность установки в поле зрения телецентрического объектива дополнительной метки, связанной с объектом измерения. Это позволяет привязать получен-



**Рис. 4.** 3D-модель СБИГП: 1 – осветитель, 2 – регистратор, 3 – рама, 4 – сборка решеток ионного двигателя, 5 – пины, 6 – защитные пластины, 7 – вакуумно-плотная трубка для вывода кабелей, 8 – телецентрический объектив, 9 – цифровая матрица, 10 – шаговый привод  
**Fig. 4.** 3D model of the GPNMS: 1 – illuminator, 2 – recorder, 3 – frame, 4 – ion thruster grid assembly, 5 – pins, 6 – protective plates, 7 – vacuum-tight tube for cable output, 8 – telecentric lens, 9 – digital matrix, 10 – stepper drive

## GPNMS AND ITS TESTING

The 3D model of the system developed is shown in Figure 4, its photograph is given in Figure 5.

The system consists of an illuminator 1 and a recorder 2. They are installed on the frame 3, and the ion thruster grid assembly 4 is placed between them. The pins 5 are installed on each of the three assembly grids. In total, the assembly has 5 installation points for the groups consisting of 3 pins; the total number of pins is up to 15.

The normal conditions required for the operation of electro-optical units are provided inside the sealed enclosures, capable of operating at an external vacuum of  $10^{-4}$  Pa and in the external temperature range from  $-70$  °C to  $+120$  °C using a heat shield and an air conditioning system (water-heated/cooled radiators and a fan). The supply pipes for the air conditioning system coolant and the communication cables between the equipment and the control computer are laid in a vacuum-tight tube extending beyond the thermal vacuum chamber through the pipe 7.

To protect the optical windows of the illuminator and recorder from settling of the ion thruster products, the protective plane-parallel glass plates 6 are installed



**Рис. 5.** Система бесконтактного измерения геометрических параметров решеток ионных двигателей (СБИГП)

**Fig. 5.** Photograph of the GPNMS

ные данные к системе координат самого объекта измерений.

Обработка теневого изображения может проводиться в двух режимах: режиме измерения изменения расстояния между решетками (фактически изменения расстояния вдоль выделенного радиального направления между вершинами пинов) и измерения расстояния от пина, расположенного на исследуемой решетке, до аналогичного базового пина, расположенного на неподвижной опоре.

Решетки имеют сферическую форму, и считается, что они деформируются по радиусу. Измерительный пин располагается вдоль радиуса решетки (по нормали к ее поверхности) в заранее известной точке, так что на изображении он виден под заранее известным углом. Проводится сечение изображения набором лучей, параллельных радиусу (по рис. 6 справа налево), с шагом в 1 пиксел на сечениях с субпикселной точностью опознаются точки пересечения лучей с тенью пинов: найденные точки составляют измеренный профиль пинов. Затем по профилю проводится опознавание положения осей отдельных пинов, и измеряется положение референтной точки на каждом пине. Далее вычисляются либо искомые разности видимых высот пинов, либо расстояние между референтными точками измерительного и базового пинов.

Определение референтной точки может представлять трудности, если поверхность пина не имеет характерных признаков. Так, на рис. 6 неясно, какую точку плоской вершины пина принять за референтную. Видно, что форма пина существенно влияет на точность измерения. Поэтому форма пина должна быть специально подобрана, а качество поверхности самих пинов должны быть высоким, что не просто соблюдать с учетом свойств их материала изготовления (керамики). В данной системе, кроме пинов с плоской вершиной, показанных на рисунке, опробовались пины, выполненные со сферической вершиной. Они и были приняты в качестве основных. Референтной точкой в этом случае служила точка максимального возвышения профиля, причем профиль аппроксимировался в окрестности референтной точки дугой окружности по методу наименьших квадратов.

В рамках успешных испытаний СБИГП в нормальных климатических условиях получены следующие результаты:

- СБИГП непрерывно без сбоев проработала более 30 часов;
- время измерения в одной измерительной позиции составило менее 0,1 с;

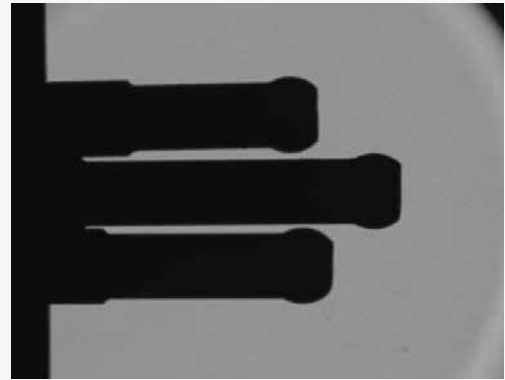


Рис. 6. Пример изображения пинов на матрице  
Fig. 6. An example of a pin image on a matrix

in front of them that can be easily dismantled for cleaning and re-installed without application of any seals.

The illuminator forms a parallel beam to illuminate one of five groups of pins. The recorder, using a telecentric lens 8, captures the resulting shadow pattern of the pins on a digital array 9 with a resolution of 2048×2048 pixels (Fig. 6).

The illuminator and recorder are moved synchronously by the step drives 10 (Fig. 5) between the measurement positions, while recording all images within 1 minute.

Special software has been developed for the GPNMS, using which calibration, measurements, and viewing of previous measurements are performed. The ability to place an additional mark related to the measurement object in the field of view of the telecentric lens has been implemented. This allows to link the received data to the coordinate system of the measurement object.

The shadow pattern can be processed in two modes: the measurement mode for changes in the distance between the grids (actual changes in the distance along the selected radial direction between the pin heads) and the measurement mode for distance from the pin located on the grid under study to a similar base pin located on a fixed support.

The grids have a spherical shape. It is believed that they are deformed along the radius. The measuring pin is located along the grid radius (normal to its surface) at a predetermined point, so that it is visible in the image at a predetermined angle. The image is cross-sectioned with a set of rays parallel to the radius (according to Fig. 6 from right to left), with an incre-





- время измерения во всех измерительных позициях составило менее 60 с;
- повторяемость измерений составила 2 мкм;
- погрешность измерений составила менее 7 мкм.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработанная нами система позволяет выполнять контроль расстояния между решетками ионного двигателя. Используемый в СБИГП теневой метод контроля, применяемый для данной задачи впервые, позволяет в режиме реального времени выполнять контроль зазоров без влияния на работу объекта измерений. Полученная погрешность 7 мкм показывает, что созданная система может быть использована в различных областях, где требуется бесконтактный контроль деформации ответственных объектов, например, в космической и авиационной промышленности. Это дает возможность повысить надежность и долговечность создаваемых двигателей, улучшить качество их работы. Наша разработка имеет потенциал для дальнейшего совершенствования и расширения областей применения, для достижения более высоких результатов в области контроля деформации решеток ионных двигателей.

## REFERENCES

1. Ramsey W. D. 12-cm Multi-cusp Ion Thruster Inert Gas Performance. NASA Contractor Report CR-168208. Loral EOS Document 84-07-29. July 1984.
2. MacRae G. S., Zavesky R. J., Gooder S. T. Structural and Thermal Response of 30 cm Diameter Ion Thruster optics. AIAA Paper. 89-2719 July 1989.
3. Pollard J. E., Welle R. P. Thrust Vector Measurements with the T5 Ion Engine. AIAA Paper. 95-2829, July 1995.
4. Soulas G. C., Frandina M. M. Ion Engine Grid Gap Measurements. 40<sup>th</sup> Joint Propulsion Conference and Exhibit cosponsored by the AIAA, ASME, SAE, and ASEE Fort Lauderdale. Florida. July 11-14, 2004.
5. Soulas G. C., Diaz E. M. Grid Gap Measurement for an NSTAR Ion Thruster. 29<sup>th</sup> International Electric Propulsion Conference. Princeton University. October 31 – November 4, 2005
6. Yuan J., Dai P., Liang D., Zhou S., Xiao S., Liang X. Grid deformation real-time measurement system of ion thruster based on videometrics. Appl. Sci. 2019; 9: 1759. doi:10.3390/app9091759
7. Sun M., Long J., Geng H., Chen X. Thermal deformation analysis and measurement of the triple grid for a 30cm diameter ion thruster. PREPRINT (Version 1) available at Research Square. – 03 October 2022. <https://doi.org/10.21203/rs.3.rs-2106649/v1>
8. Zav'yalov P. S., Vlasov E. V., Gushchina A. A., Sokolov E. V., Sartakov V. YU. Optiko-elektronnaya sistema beskontaktnogo kontrolya geometricheskikh parametrov bronebojnyh serdechnikov i pul'. *Datchiki i sistemy*. 2018; 10(229): 34–39. Завьялов П. С., Власов Е. В., Гущина А. А., Соколов Е. В., Сартаков В. Ю. Оптико-электронная система бесконтактного контроля геометрических параметров броневойных сердечников и пуль. *Датчики и системы*. 2018; 10(229): 34–39.
9. Zhimuleva, E. S., Zavvalov P. S., Kravchenko M. S. Development of Telecentric Objectives for Dimensional Inspection Systems. *Optoelectronics, Instrumentation and Data Processing*. 2018; 54(1): 52–60. DOI 10.3103/S8756699018010090.
10. Gurenko V. M., Kastorsky L. B., Kiryanov V. P., Kiryanov A. V., Kokarev S. A., Vedernikov V. M., Verkhoglyad A. G. Laser writing system CLWS-300/C-M for the microstructures synthesis on the axisymmetric 3-D surfaces // *Proceedings of SPIE – The International Society for Optical Engineering: Seventh International Symposium on Laser Metrology Applied to Science, Industry, and Everyday Life*, 09–13.09.2002. SPIE, SPIE Russia Chapter, OSA, ISTC, MIST; editors: Y.V. Chuqui, S. N. Bagayev, A. Weckenmann, P. H. Osanna. Novosibirsk. 2002; 4900:320–325. DOI 10.1117/12.484573.

ment of 1 pixel; the intersection points of the rays with the pin shadow are found with the sub-pixel accuracy on the sections; the points obtained make up the measured pin profile. Then, the profile is used to identify the position of the individual pin axes and measure the reference pin position on each pin. Further, either any required differences in the visible heights of the pins or any distance between the reference points of the measuring and base pins are calculated.

The reference point determination can be a difficult process if the pin surface does not have any typical features. Thus, it is unclear in Fig. 6 what point of the flat top of the pin shall be taken as the reference point. It can be seen that the pin shape significantly affects the measurement accuracy and must be specially selected. Moreover, the pins must be manufactured with good accuracy and surface quality that is not an easy task given their material (ceramics) properties. In this system, in addition to the flat-top pins shown in the figure, the pins with a spherical top have been tested. Such pins have been accepted as the main ones. The reference point in this case was the point of maximum profile elevation, and the profile was approximated in the vicinity of the reference point by a circular arc using the least squares method.

As a part of the successful GPNMS tests in normal climatic conditions, the following results have been obtained:

- the GPNMS was operated continuously without any failures for more than 30 hours;
- the measurement time in one measuring position was less than 0.1 s;
- the measurement time in all measuring positions was less than 60 s;
- the measurement repeatability was 2  $\mu\text{m}$ ;
- the measurement error was less than 7  $\mu\text{m}$ .

## CONCLUSION

The system developed by us allows to control the distance between the ion thruster grids. The shadow control method used in the GPNMS and applied for this task for the first time, allows for real-time control of the gaps without affecting operation of the measured object. The resulting error equal to 7 microns shows that the system developed can be used in various fields where non-contact deformation control over the critical objects is required, for example, in the space and aviation industries. It provides and opportunity to increase the reliability and durability of thrusters being produced and improve their operating quality. Our development has the prospects of further improvement and expansion of the range of applica-



## АВТОРЫ

**Завьялов Петр Сергеевич**, окончил Новосибирский государственный технический университет по специальности «Физика», к. т. н., помощник директора по научно-техническим проектам в Конструкторско-технологическом институте научного приборостроения СО РАН (КТИ НП СО РАН). Область научных интересов: дифракционные оптические элементы, прикладная оптика, системы технического зрения и размерного контроля. Идентификатор автора в РИНЦ 177280.

Вклад в работу – идея, организация работы.

**Власов Евгений Владимирович**, окончил Новосибирский государственный технический университет, магистр техники и технологии по специальности «Оптотехника», н. с. КТИ НП СО РАН. Область научных интересов: оптико-электронные приборы и комплексы, разработка оптических установок контроля и измерений геометрических параметров. Идентификатор автора в РИНЦ 677894.

Вклад в работу – дизайн эксперимента, проведение эксперимента.

**Белобородов Алексей Вадимович**, окончил Новосибирский электротехнический институт по специальности «Электрофизические установки и ускорители заряженных частиц», работает ведущим программистом в КТИ НП СО РАН. Область научных интересов: обработка изображений для дефектоскопии и размерного контроля, программирование. Идентификатор автора в РИНЦ 177287.

Вклад в работу – обработка результатов, обсуждения.

**Кравченко Максим Сергеевич**, окончил Новосибирский государственный технический университет, магистр по специальности «Прикладная информатика», н. с. КТИ НП СО РАН. Область научных интересов: спекл-интерферометрия, оптико-электронные приборы и комплексы, термовакуумные испытания. Идентификатор автора в РИНЦ 825558.

Вклад в работу – дизайн эксперимента, организация работы.

**Гущина Анна Александровна**, окончила Сибирский государственный университет телекоммуникаций и информатики по специальности «Программное обеспечение вычислительной техники и автоматизированных систем», ведущий программист, КТИ НП СО РАН. Область научных интересов: обработка изображений для дефектоскопии и размерного контроля, программирование. Идентификатор автора в РИНЦ 177286.

Вклад в работу – обработка результатов, обсуждения.

**Скоков Дмитрий Владимирович**, окончил Новосибирский государственный технический университет по специальности «Металлообрабатывающие станки и комплексы», главный конструктор КТИ НП СО РАН. Область интересов: 3D-проектирование. Идентификатор автора в РИНЦ 933269.

Вклад в работу – дизайн эксперимента, проведение эксперимента.

tions to achieve better results in the field of control of ion thruster grid deformation.

## ABOUT AUTHORS

**Zavyalov Petr Sergeevich**, graduated from the Novosibirsk State Technical University (NSTU) with a degree in Physics, Cand. of Sc. (Eng.) Works as an assistant director for scientific and technical projects at the Technological Design Institute of Scientific Instrument Engineering of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences (TDI SIE SB RAS). Research interests: diffractive optical elements, applied optics, systems of technical vision and dimensional control. Author ID in RSCI 177280. Contribution – idea, organization of work.

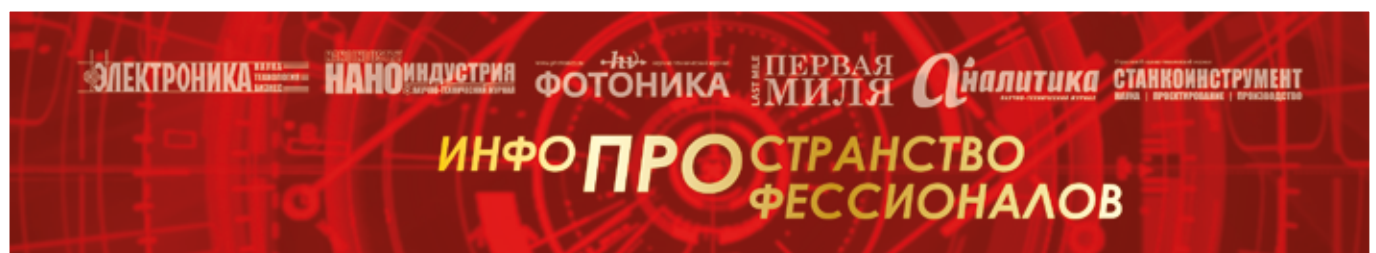
**Vlasov Evgeny Vladimirovich**, graduated from the NSTU, Master of Engineering and Technology with a degree in Optoelectronics, works as a researcher at the TDI SIE SB RAS. Research interests: optoelectronic devices and complexes, development of optical installations for monitoring and measuring geometric parameters. Author ID in RSCI 677894. Contributions: experimental design, experiment execution.

**Aleksey Vadimovich Beloborodov**, graduated from the Novosibirsk Electrotechnical Institute with a degree in Electrophysical Installations and Charged Particle Accelerators, works as a leading programmer at TDI SIE SB RAS. Area of interest: image processing for flaw detection and dimensional control, programming. Author ID in RSCI 177287. Contribution – processing of results, discussions.

**Kravchenko Maxim Sergeevich**, graduated from NSTU, Master in Applied Informatics, works as a researcher at KTI NP SB RAS. Research interests: speckle interferometry, optoelectronic devices and complexes, thermal vacuum tests. Author ID in RSCI 825558. Contribution – experimental design, organization of work.

**Gushchina Anna Alexandrovna**, graduated from the Siberian State University of Telecommunications and Informatics with a degree in Computer Engineering and Automated Systems Software, works as a leading programmer at KTI NP SB RAS. Research interests: image processing for flaw detection and dimensional control, programming. Author ID in RSCI 177286. Contribution – processing of results, discussions.

**Skokov Dmitry Vladimirovich**, graduated from the NSTU with a degree in metalworking machines and complexes, works as a chief designer at KTI NP SB RAS. Area of interest: 3D design. Author ID in RSCI 933269. Contributions: experimental design, experiment execution.



Мы на  YouTube



ТЕХНОСФЕРА

Подписывайтесь

