

Е. В. Власов^{1}, П. С. Завьялов¹, А. В. Белобородов¹, М. С. Кравченко, А. А. Гущина¹*

Измерение геометрических параметров элементов ионных двигателей теневым методом

¹ Конструкторско-технологический институт научного приборостроения СО РАН,
г. Новосибирск, Российская Федерация
*e-mail: vlasov@tdisie.nsc.ru

Аннотация. Один из наиболее важных параметров ионного двигателя, который существенно влияет на его функциональность и длительность службы – это зазор между экранной, ускоряющей и замедляющей сетками блока ионной оптики. В процессе работы ионного двигателя зазор изменяется вследствие нагрева и теплового расширения сеток. Для правильной оценки рабочих параметров и срока службы ионного двигателя крайне важно знать значение зазора между сетками. В данной работе рассматривается способ измерения, основанный на методе теневой проекции в параллельных лучах. Штифты, установленные на поверхности решетки, используются для регистрации положения сеток. Регистрация изображения осуществляется телецентрическим объективом, что уменьшает требования к точности позиционирования измеряемого объекта.

Ключевые слова: оптические измерения, теневой метод, измерение геометрических параметров, решетка ионного двигателя

E. V. Vlasov^{1}, P. S. Zavyalov¹, A. V. Beloborodov¹, M. S. Kravchenko¹, A. A. Guschina¹*

Measurement of Geometric Parameters of Ion Engine Elements by Optical Method of Shadow Projection

¹ Design and Technology Institute of Scientific Instrument Engineering, Siberian Branch,
Russian Academy of Sciences, Novosibirsk, Russia
* e-mail: vlasov@tdisie.nsc.ru

Abstract. One of the most critical parameters influencing the functionality and service life of an ion engine is the gap between the screen, accelerating, and decelerating grids of the ion optics unit. During the operation of the ion engine, changes to the gap occur due to grid heating and thermal expansion. It is crucial for a proper assessment of an ion engine's operating parameters and service life to determine the value of the gap between the grids. Our study presents a measurement method based on the shadow projection method in parallel beams, using pins affixed to the surface of the grating to record the position of the grids. Image registration is carried out using a telecentric lens, which reduces the necessary positioning accuracy of the measurement object.

Keywords: optical measurements, shadow method, measurement of geometric parameters, ion thruster array

Введение

Ионный двигатель – тип электрического ракетного двигателя, принцип работы которого основан на создании реактивной тяги на базе ионизированного газа, разогнанного до высоких скоростей в электрическом поле. Многие из важнейших характеристик ионного (плазменного) двигателя напрямую связаны с

ускорительной системой, построенной на основе узла ионной оптики. Такой узел состоит из двух или трех электродов (рис. 1), имеющих отверстия для выхода плазменной струи.

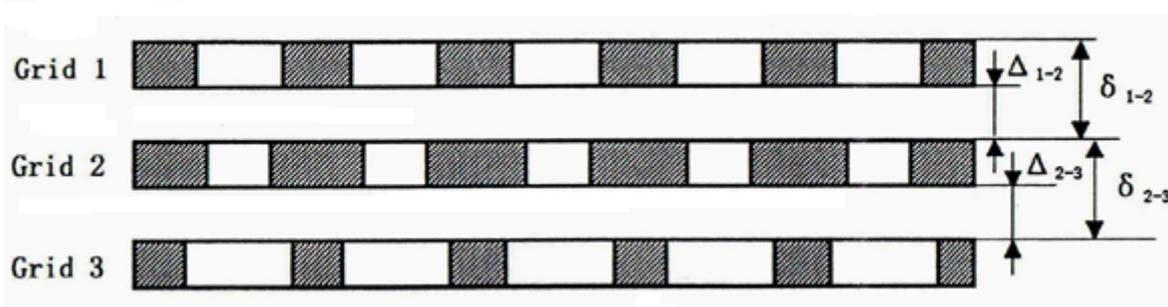


Рис. 1. Решетки ионного двигателя: Grid1 – экранная, Grid2 – ускоряющая, Grid3 – дополнительная

Обычно это экранная и ускоряющая решетки. Критический параметр ионного узла, который напрямую влияет на рабочие параметры ионной оптики, такие как способность генерирования тока пучка, напряжение на ускоряющей сетке, а также срок службы – это расстояние (зазор) между решетками. Необходимый зазор устанавливается во время сборки ионной оптики, однако, во время работы двигателя он изменяется из-за дифференциального нагрева и, следовательно, теплового расширения экранной и ускоряющей решеток. Это особенно важно для решеток из материалов с относительно высокими коэффициентами теплового расширения, в частности для металлических решеток. Информация о величине зазора между решетками в горячем состоянии требуется для правильной оценки рабочих характеристик ионной оптики и срока ее службы.

Методы и материалы

Попытки измерения зазора между горячими решетками уже делались разными исследователями. Рэмси [1] измерил зазор горячей сетки визуально путем наблюдения отметок (маркеров) на отградуированных металлических штифтах, которые были прикреплены к отверстиям экранной сетки и торчали сквозь отверстия ускоряющей сетки. Макрей и др. [2] измерили зазор в горячем состоянии для 30 см ионной оптики солнечного электроракетного двигателя SEPS (solar electric propulsion system) оперируя с диапазоном уровней мощности разряда. Поллард и Уэлл [3] измерили зазор между горячими сетками ионного двигателя UK T5 путем визуализации центральных отверстий экранной и ускоряющей сеток под большим углом относительно нормали к поверхности с помощью двух длиннофокусных микроскопов, рассматривающих отверстия в противоположных сторонах решеток. Поскольку проведенные измерения зазора имели плохое разрешение, вносили ограничения в работу ионного двигателя или были слишком сложны, G.C. Soulas и M.M. Frandina предложили новую

методику для проведения исследований. В публикации [4] авторами описывается простая методика измерения динамического зазора между горячими решетками ионного двигателя, работающего с генерацией луча. Подавляющее большинство систем измерения зазора между решетками использует один и тот же метод работы в отраженном свете [5]. Теневые методы позволяют достичь в данном случае более высокой точности. Расстояние, на котором может находиться измеряемый объект, слабо влияет на точность измерений и позволяет вывести измерительную систему из ионного пучка, обеспечив более комфортные условия работы [6].

Основным направлением считается создание измерительной системы на основе теневого метода в параллельных лучах. Для вынесения из пламени работающего ионного двигателя необходимо использование телецентрического объектива с увеличенным передним рабочим отрезком. Выбор объектива такого типа позволяет снизить требования к точности позиционирования объекта измерения [7]. При этом будет контролироваться длина выступающей части штифтов, предварительно установленных на решетки. Предлагаемый вариант схемы измерения показан на рис. 2.

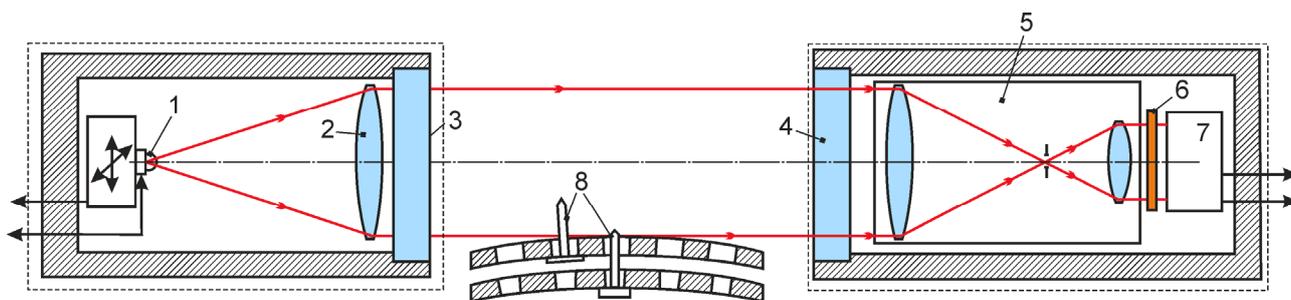


Рис. 2. Схема оптико-механического блока: 1 – сверхяркий светодиод, 2 – коллиматор, 3,4 – иллюминаторы, 5 – телецентрический объектив, 6 – полосовой светофильтр, 7 – камера, 8 – штифты

Измерительный блок состоит из осветительной и фотоприемной частей. По командам контроллера управляющей системы измеряемые элементы подсвечиваются импульсным светодиодом 1, и их изображения, сформированные телецентрическим объективом 5, регистрируются цифровой камерой 7. При этом импульс света от светодиода 1 синхронизирован с затвором камеры 7. Двухкоординатная подвижка используется для компенсации температурных уводов основания и осуществляет подстройку положения светодиода 1 так, чтобы освещенность на камере 7 была равномерна по всему изображению. Штифты 8 могут быть установлены как в экранную, так и в ускоряющую решетки, что позволяет одинаковыми алгоритмами определять их положение, снижая таким способом погрешность измерений. При этом они расположены попарно и видны одновременно в одном кадре. Для обеспечения необходимой точности измерений будет использоваться цифровая камера с высоким разрешением.

Изображения передаются в компьютер, где выполняется цифровая обработка, позволяющая определить величину смещения экранной и ускоряющей решеток и зазора между ними.

Для уменьшения влияния пламени используется красный светодиод и соответствующий полосовой фильтр δ ($\lambda = 650 \pm 20$ нм). В этом участке спектра нет линий поглощения спектра светодиодного источника в плазме Ar или Xe. К тому же фотоприемник не воспринимает свечение плазмы, которое, в основном, расположено в синей части спектра. Таким образом, удается существенно увеличить соотношение сигнал/шум.

Результаты

Авторами реализован следующий способ измерения, при котором несколько штифтов располагаются на одной вертикальной линии, проходящей через ось решеток ионного двигателя. Чтобы измерять положение всех штифтов нужно, чтобы все они находились в поле зрения объектива, либо объектив нужно перемещать от одной позиции установленных штифтов к другой. Первый вариант неперспективен, т.к. даже если использовать измеритель с полем зрения 450 мм, то перемещения штифта (1 мм) на таком поле будут малозаметными, а точность измерений недостаточной.

Второй вариант, приведенный на рис. 3, реализуется путем перемещения измерительной системы по вертикали.

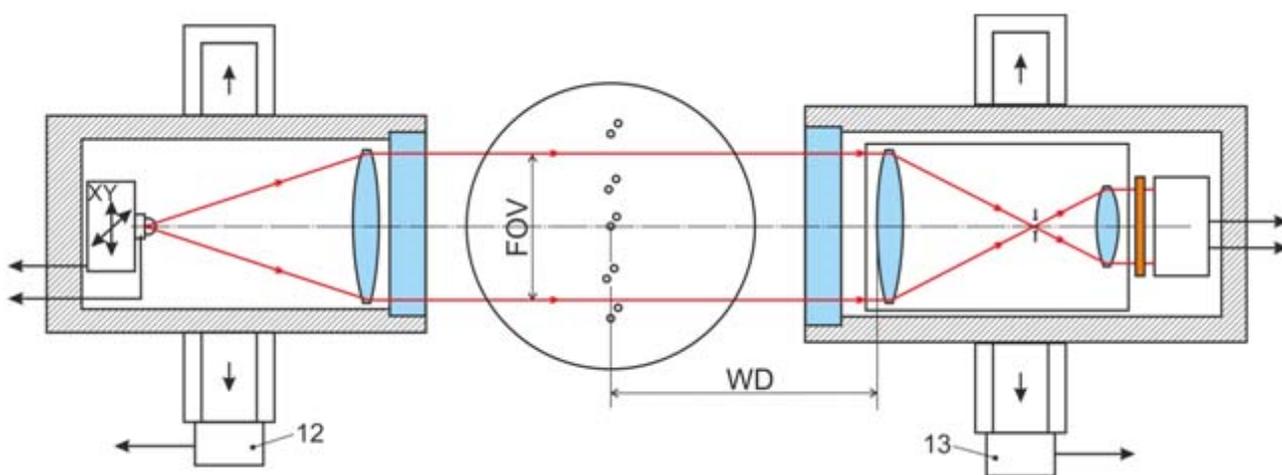


Рис. 3. Схема измерения штифтов: WD – рабочее расстояние, FOV – поле зрения.

На рис. 4 показаны полученные изображения с пяти измерительных позиций, в каждой из них в поле измерений попадает три штифта, каждый из которых установлен на экранной, ускоряющей и дополнительной решетке. А также в одну из позиций дополнительно введен референсный штифт для задания точки отсчета.

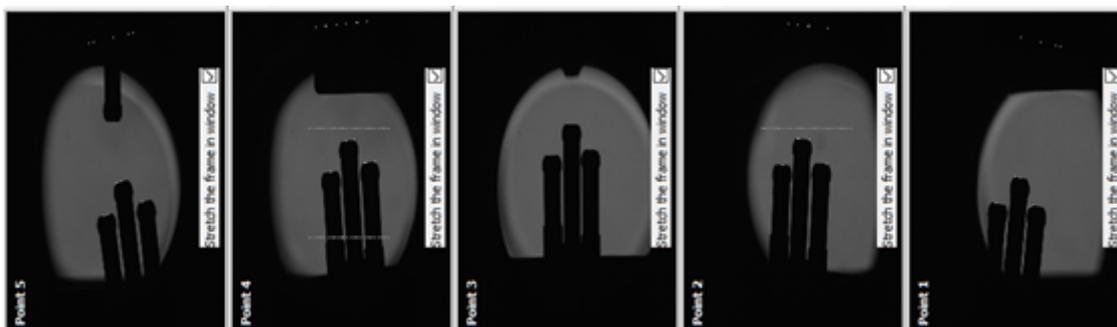


Рис. 4. Полученные изображения штифтов, установленных вертикально вдоль оси решеток ионного двигателя

Фотоприемный блок с помощью телецентрического объектива фиксирует получающуюся теневую картину на цифровой матрице с разрешением 2048×2048 пикселей. По результатам определения вершин штифтов производится вычисление зазора между решетками. На рис. 5 показана одна из пяти групп штифтов. При необходимости измерения штифтов, находящихся в фокусе, но смещенных от центра двигателя, требуется учитывать угол, под которым они наклонены к координатным осям фотоприемного устройства:

$$Z = (L - T_p) \cdot \text{tg}(\varphi), \quad (1)$$

где φ – угол наклона поверхности решетки в точке измерений; Z – величина зазора; L – размер видимой части штырька, T_p – толщина решетки.

Более того, нужно учитывать кривизну решетки, вследствие которой штырьки, смещенные относительно центра, оказываются смещенными вдоль оси двигателя. Самый простой вариант – определять по полученному изображению положение касательной к поверхности ускоряющей решетки в точке, где находится штырек. Далее, смещение штырька будет определяться относительно точки пересечения штырька с касательной.

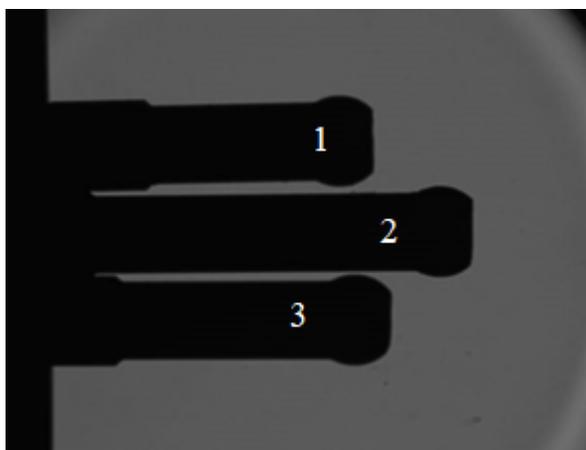


Рис. 5. Изображения штифтов на матрице

В рамках испытаний в нормальных климатических условиях получены следующие результаты:

- время измерения в одной измерительной позиции составило менее 0,1 с;
- время измерения во всех измерительных позициях составило менее 60 с;
- повторяемость измерений составила 2 мкм;
- погрешность измерений составила менее 7 мкм.

Заключение

Разработанный нами способ контроля расстояния между решетками ионного двигателя позволит повысить надежность создаваемых двигателей, улучшить качество их работы и увеличить срок службы. Предлагаемый подход обеспечивает возможность получения данных в режиме реального времени без влияния на работу измеряемого объекта. Полученная погрешность 7 мкм показывает, что данный метод может быть использован в различных областях, где требуется контроль деформации, как решеток, так и других ответственных объектов, например в космической и авиационной промышленности. Наше исследование имеет потенциал для дальнейшего усовершенствования и расширения областей применения для достижения более высоких результатов в области контроля деформации решеток ионных двигателей.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

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., and Gooder, S.T., «Structural and Thermal Response of 30 cm Diameter Ion Thruster Optics», AIAA Paper 89-2719, July 1989.
3. Pollard, J.E. and Welle, R.P., «Thrust Vector Measurements with the T5 Ion Engine», AIAA Paper 95-2829, July 1995.
4. Ion Engine Grid Gap Measurements / George C. Soulas, Michael M. Frandina // 40th Joint Propulsion Conference and Exhibit cosponsored by the AIAA, ASME, SAE, and ASEE Fort Lauderdale, Florida, July 11-14, 2004.
5. Grid Gap Measurement for an NSTAR Ion Thruster/ George C. Soulas, Esther M. Diaz // 29th International Electric Propulsion Conference, Princeton University, October 31 – November 4, 2005.
6. Оптико-электронная система бесконтактного контроля геометрических параметров бронебойных сердечников и пуль / П. С. Завьялов, Е. В. Власов, А. А. Гущина [и др.] // Датчики и системы. – 2018. – № 10(229). – С. 34-39.
7. Zhimuleva, E. S. Development of Telecentric Objectives for Dimensional Inspection Systems / E. S. Zhimuleva, P. S. Zavyalov, M. S. Kravchenko // Optoelectronics, Instrumentation and Data Processing. – 2018. – Vol. 54, No. 1. – P. 52-60. – DOI 10.3103/S8756699018010090.

© Е. В. Власов, П. С. Завьялов, А. В. Белобородов,
М. С. Кравченко, А. А. Гущина, 2023