

УДК 519.63

Численное исследование истечения газа ксенона через сверхзвуковое сопло в вакуумную область

Веселов М.Р.¹, Дерюгин Ю.Н.¹

Филиал Московского государственного университета имени М. В. Ломоносова в
городе Сарове¹

Аннотация: В статье представлен двумерный метод расчета вязких сжимаемых течений в плоских и осесимметричных областях. Метод основан на использовании неструктурированных сеток и неявных приближений уравнений Навье–Стокса. Разностные уравнения получены на основе метода контрольного объема в дельта-форме относительно приращения требуемого решения. Для повышения разрешающей способности схемы используется одномерная линейная реконструкция решения для определения параметров предрасположенности потока. Вязкие течения аппроксимируются центральными разностями. Система разностных уравнений решается с помощью алгебраического многосеточного решателя. Невязкие течения рассчитываются в соответствии с явной схемой. С использованием разработанной методики проведены численные исследования формирования стационарного потока ксенона в сопловом устройстве и истечения сверхзвуковой струи в область вакуума. Расчетные параметры струи показывают, что в потоке могут образовываться кластеры. Представлены результаты сравнения результатов расчета с экспериментальными данными.

Ключевые слова: математическое моделирование, численные методы, вакуумная область.

Постоянно возрастающий объем обрабатываемых данных требует создание процессоров со все более улучшенными характеристиками мощности и скорости вычислений. Во многих странах ведутся работы по разработке новых технологий и развитию новых направлений, которые используют новые физические принципы в производстве интегральных схем. Одним из таких направлений является разработка литографических установок, предназначенных для нанесения внутренних структур микросхем на кремниевые пластины с максимально высоким разрешением ($\sim 10^{-5}$ нм и менее). Для достижения такого разрешения требуется использовать световой источник в экстремально ультрафиолетовом (EUV) диапазоне длин волн. Наиболее перспективным источником EUV излучения является плазма, излучающая кванты с энергией, близкой к 100 эВ, которую можно получить за счет воздействия мощного короткого импульса лазерного излучения на плотную газовую струю ксенона. Один из важных путей практической реализации эффективного источника EUV-излучения является создание струи газа с заданными геометрическими и термодинамическими параметрами. Согласно проведенным оценкам, показано, что при интенсивности лазерного излучения порядка 100 ГВт/см² на длине волны 1 мкм и плотности струи ксенона до 0.01 г/см³, достигается уровень конверсии лазерного излучения в EUV до 3%, достаточных для задач литографии. Для практической реализации эффективного источника EUV-излучения необходимо создание установки, позволяющей формировать струи газа с заданными геометрическими и термодинамическими параметрами. В связи с этим актуальной задачей является разработка расчетной технологии для численного моделирования нестационарных и стационарных течений невязкого

и вязкого газа в каналах и соплах.

В данной работе представлена двумерная методика расчета вязких сжимаемых течений в плоских и осесимметричных областях [1]. Методика основана на использовании неструктурированных сеток, неявных аппроксимаций уравнений Навье–Стокса. Разностные уравнения получены на основе метода контрольного объема в так называемой дельта форме, относительно приращения искомого решения. Для повышения разрешающей способности схемы используется одномерная линейная реконструкция решения для определения предраспадных параметров потока. Вязкие потоки аппроксимируются центральными разностями. Система разностных уравнений решается с использованием алгебраического многосеточного решателя. Невязкие потоки рассчитываются по явной схеме.

С использованием построенной методики проведены численные исследования формирования стационарного потока ксенона в сопловом устройстве и истечения сверхзвуковой струи в вакуумную область. Расчетные параметры струи показывают, что в потоке могут образовываться кластеры. Приводятся результаты сопоставления результатов расчетов с данными эксперимента.

Литература

1. Веселов М.Р., Дерюгин Ю.Н. Параллельная методика расчета двумерных вязких сжимаемых течений на неструктурированной сетке. В печати.

MSC 76D05

Numerical investigation of the outflow of xenon gas through a supersonic nozzle into a vacuum region

M.R. Veselov¹, Yu.N. Deryugin¹

Branch of Lomonosov Moscow State University in Sarov¹

Abstract: This paper presents a two-dimensional method for calculating viscous compressible flows in flat and axisymmetric regions. The technique is based on the use of unstructured grids, implicit approximations of the Navie–Stokes equations. The difference equations are obtained based on the control volume method in the so-called delta form, relative to the increment of the desired solution. To increase the resolution of the circuit, a one-dimensional linear reconstruction of the solution is used to determine the predisposition parameters of the flow. Viscous flows are approximated by central differences. The system of difference equations is solved using an algebraic multigrid solver. Inviscid flows are calculated according to an explicit scheme. Numerical studies of the formation of a stationary xenon flow in a nozzle device and the outflow of a supersonic jet into a vacuum region have been carried out using the constructed methodology. The calculated parameters of the jet show that clusters can form in the flow. The results of comparing the calculation results with experimental data are presented.

Keywords: mathematical modeling, numerical methods, vacuum region.