04

Моделирование газодинамических процессов в ксеноновом источнике излучения экстремального ультрафиолета с газоструйной мишенью

© Т.М. Линкова,[1] В.В. Медведев,[2] В.В. Иванов,[2] И.Ю. Вичев,[3] В.С. Коновалов[3]

[1]Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет),
141700 Долгопрудный, Московская обл., Россия
[2]Институт спектроскопии РАН (ИСАН),
108840 Троицк, Московская обл., Россия
[3]Федеральный исследовательский центр Институт прикладной математики им. М.В. Келдыша РАН,
125047 Москва, Россия
e-mail: linkova.t@phystech.edu

Поступило в Редакцию 15 апреля 2026 г.
В окончательной редакции 15 апреля 2026 г.
Принято к публикации 15 апреля 2026 г.

Описан подход к полному моделированию газодинамики в камере источника излучения на длине волны 11.2 nm на основе плазмы ксенона. Рассмотрена архитектура модели с учетом взаимодействия газа и плазмы, а также химических реакций многокомпонентной газовой смеси. Обозначены направления, требующие дополнительных исследований. Показана мотивация использования газодинамического моделирования в задачах оптимизации установки источника экстремального ультрафиолетового излучения.

Ключевые слова: плазма ксенона, экстремально ультрафиолетовая фотолитография, литография на длине волны 11.2 nm, защита оптики.

DOI: 10.61011/JTF.2026.09.63486.102-26

Введение

В настоящее время в ИФМ РАН ведутся работы по созданию прототипа проекционного фотолитографа, использующего экстремальное ультрафиолетовое излучение (ЭУФ) с длиной волны 11.2 nm [1]. Указанная длина волны отличается от стандартной длины волны ЭУФ литографии — 13.5 nm. Это отличие обусловлено выбором альтернативной комбинации источника излучения и зеркальной оптики. Если литография на длине волны 13.5 nm использует источники излучения на основе плазмы многозарядных ионов олова (Sn) и зеркальную оптику на основе молибден-кремниевых (Mo/Si) интерференционных покрытий, то литография на длине волны 11.2 nm подразумевает использование источников излучения на основе плазмы многозарядных ионов ксенона (Xe) и зеркальной оптики на основе рутений-бериллиевых (Ru/Be) интерференционных покрытий. Такой переход мотивирован главным образом двумя причинами. Во-первых, Ru/Be-покрытия обеспечивают более высокий коэффициент отражения. Для оптической колонны литографа, состоящей из 11 отражающих поверхностей, суммарный выигрыш в пропускной способности Ru/Be-оптики может достигать 45 % [2]. Во-вторых, переход на Xe в качестве излучателя позволяет исключить проблему загрязнения оптики металлическими парами и каплями, остро стоящую в случае источников излучения, использующих Sn-плазму.

В источниках, работающих на длине волны 13.5 nm, для защиты зеркала-коллектора от распыления его поверхности высокоэнергетичными ионами и загрязнения оловом применяется газовая защита [3]. В качестве защитного газа используется водород, который обладает наибольшей прозрачностью в ЭУФ диапазоне. Напуск и откачка водорода в камере источника организуется таким образом, чтобы поток импульса газовой среды $(rho\vec{u})$ по направлению от зеркала-коллектора к плазме компенсировал суммарный импульс потоков различных частиц олова в направлении коллектора. Кроме того, необходимо производить оптимизацию газодинамических потоков внутри камеры коллектора, чтобы избежать формирования вихревых течений, организующих перенос паров олова на определенные области поверхности коллектора. Оптимизация газодинамических течений в камере источника производится с помощью специализированных компьютерных моделей, описывающих взаимодействие плазмы с атмосферой газа низкого давления [4,5].

Как отмечалось выше, при переходе на ксеноновые источники исключается проблема осаждения материала плазмы на различных поверхностях. Однако вопрос о повреждении интерференционных зеркальных покрытий высокоэнергетичными ионами из плазмы остается открытым. Очевидно, что предотвращение такого механизма повреждения оптики требует проектирования системы газовой защиты. Кроме того, оптические эле-

менты не должны подвергаться слишком интенсивным тепловым нагрузкам. Для этого требуется исследование передачи энергии и импульса от плазмы к газу и рассмотрение дальнейшего распространения тепла по камере источника. Также стоит вопрос о накоплении ксенона в объеме установки, что приводит к перепоглощению рабочего коротковолнового излучения [6]. Требует исследования задача об организации эффективного вывода отработавшего ксенона. Оптимизация газовых потоков и параметров струи-мишени с целью снижения уровня фотоионизационного перепоглощения позволит увеличить эффективность работы источника [7]. В дополнении к этому возникает необходимость создания системы рекуперации ксенона в связи с тем, что ксенон достаточно дорогой газ (рыночная стоимость 1 kg ксенона в 500–600 раз превышает стоимость 1 kg олова). Все обозначенные вопросы требуют разработки компьютерной модели, описывающей взаимодействие ксеноновой плазмы с газовой атмосферой, и позволяющей рассчитывать газодинамические потоки в камере источника излучения.

В настоящей работе описывается архитектура компьютерной модели взаимодействия ксеноновой плазмы, излучающей в ЭУФ диапазоне, с защитной газовой атмосферой. Приводится описание ключевых физических процессов, которые необходимо включить в модель. Обсуждаются имеющиеся и требующие измерений или дополнительных расчетов данные по константам релевантных физических процессов. Формулируются требования к модели со стороны инженерных расчетов для проектирования камеры промышленного источника излучения. Обсуждается текущий статус разработки такой модели.

1. Структура модели

Основой моделирования является описание газодинамики в камере источника излучения. Расчет газовой фазы производится с помощью решения системы уравнений Навье–Стокса, детальное описание которой будет представлено ниже в разд. 2. Однако задача предполагает целостное моделирование процессов в источнике ЭУФ излучения, для которого решения только газодинамики течений недостаточно. Наличие плазмы в объеме является определяющим фактором для установления потоков в камере. В таком случае необходимо учитывать взаимодействие плазмы и газа. Кроме того, для моделирования источника необходимо описывать распространение ЭУФ излучения, а также химические реакции многокомпонентной газовой смеси в объеме камеры и на ее поверхностях. Для корректного учета этих процессов в модели используются дополнительные модули. Результат работы модулей учитывается при решении основной системы уравнений Навье–Стокса.

Наличие лазерно-индуцированной плазмы в объеме приводит к протеканию в системе процессов с различными характерными временами. Механизмы взаимодействия лазерного импульса с мишенью, формирование горячей плазмы, а также генерация ЭУФ излучения имеют короткие характерные времена длительности в диапазоне $0-0.1\,\mu$s. Времена взаимодействия ионов плазмы и газа имеют порядок $0.1-10\,\mu$s. Исследование установившихся газодинамических течений требует рассмотрения более длительных времен, которые могут достигать $0.1-1$ s. Процессы формирования горячей плазмы имеют короткие времена длительности и не разрешаются явно в данной задаче, так как целью текущего моделирования является описание газодинамики, для которой необходимо моделирование более длительных времен до 1 s. Влияние горячей плазмы учитывается в моделировании в виде входных данных. В качестве входных данных необходимо задавать спектр излучения плазмы рабочего вещества, а также информацию об энергетическом спектре ионов и их пространственном распределении. Ионы, вылетающие из области разряда, могут иметь большую энергию. Транспорт ионов высоких энергий должен рассматриваться отдельно от газовой фазы. В программе распространение быстрых ионов рассчитывается методами Монте–Карло.

Выстрелы лазера происходят с некоторой частотой, которая в конечном счете определяет мощность источника излучения. Источник излучения для литографии должен обладать высокой мощностью, что приводит к необходимости рассматривать в задаче высокочастотные режимы формирования плазменных импульсов. Характерная частота повторения импульсов может составлять 50 kHz. Модель позволяет исследовать работу источника с такими частотами.

2. Уравнения модели

Течение в камере источника моделируется с использованием уравнений Навье–Стокса для сжимаемого ламинарного течения в нестационарной постановке со свойствами потока, зависящими от температуры и состава смеси.

Решается следующая система уравнений радиационной газодинамики (РГД):

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \operatorname{div}(\rho \mathbf{u}) = Q_{\rho}^{ext}, \tag{1}$$

$$\frac{\partial \rho \mathbf{u}}{\partial t} + \operatorname{div}(\rho \vec{u} \otimes \vec{u}) + \nabla p = \mathbf{Q}_{\rho u}^{v} + \mathbf{Q}_{\rho u}^{ext}, \tag{2}$$

$$\frac{\partial \rho E}{\partial t} + \operatorname{div}([\rho E + p]\mathbf{u}) = Q_{\rho E}^{T} + Q_{\rho E}^{v} + Q_{\rho E}^{ext}, \tag{3}$$

где верхний индекс $(\cdot)^{v}$ обозначает вязкие члены, $(\cdot)^{ext}$ — члены, внешние по отношению к течению (такие как плазма и т. п.), а символ $\otimes$ обозначает тензорное произведение двух векторов. Уравнения (1)–(3) записаны в общей трехмерной ($3D$) форме, где все зависимые переменные являются функциями времени t и координат $\vec{x}$ (трехмерный декартов вектор). А именно $T = T(t, x)$ — температура смеси, $\rho = \rho(t, x)$ — плотность смеси,

$\mathbf{u} = \mathbf{u}(t, \mathbf{x})$ — скорость потока, $p = p(T, \rho, e)$ — давление. Полная энергия ρE включает внутреннюю энергию ρe и кинетическую энергию

$$\rho E = \rho e + \frac{\rho u^2}{2},$$

где массовая удельная внутренняя энергия может быть вычислена из температуры смеси T как

$$e(T) = \int_0^T C_V(t)dt.$$

Вязкие члены определяются следующим образом:

$$\mathbf{Q}^{\nu}_{\rho u} = -\nabla\sigma,$$

$$\mathbf{Q}^{\nu}_{\rho E} = -\vec{u} \otimes \nabla\sigma,$$

где σ — тензор вязких напряжений

$$\sigma = -\mu \left\{ [\nabla\mathbf{u} + (\nabla\mathbf{u})^T] - \frac{2}{3}\mathbf{I}(\mathrm{div}\mathbf{u}) \right\},$$

$\mu = \mu(T, Y)$ — коэффициент динамической вязкости.

Уравнение энергии (3) включает источниковый член, обусловленный теплопроводностью

$$Q^T_{\rho E} = -\mathrm{div}(\mathbf{h}_T), \quad \mathbf{h}_T = -\kappa\nabla T,$$

$\kappa = \kappa(T, Y)$ — коэффициент теплопроводности.

Дополнительно решаются уравнения переноса компонентов смеси

$$\frac{\partial \rho Y_i}{\partial t} + \mathrm{div}\rho Y_i \mathbf{u}) = Q^D_{\rho Y_i} + Q^{ext}_{\rho Y_i},$$

где Y_i — массовая доля i-й компоненты, $Q^D_{\rho Y_i}$ — диффузионный член

$$Q^D_{\rho Y_i} = -\mathrm{div}(\mathbf{h}_{Y_i}), \qquad \mathbf{h}_{Y_i} = -D_i \nabla Y_i,$$

$D_i = D_i(T, \rho, Y)$ — коэффициент диффузии i-й компоненты.

Система уравнений замыкается уравнением состояния идеального газа

$$p = \rho R T,$$

где R — газовая постоянная для смеси ($R = R_0/M$, $R_0 = 8.31$, [J/(mol·K], M — молярная масса смеси, [kg/mol]).

3. Общие требования к решению

Динамику струи ксенона после воздействия лазера, а также его распространение и вывод из камеры необходимо моделировать с достаточной точностью. Как показал опыт предыдущих исследований, газодинамический модуль должен обладать рядом свойств. Код должен поддерживать как явные, так и неявные шаги по времени. Это необходимо для организации оптимальной работы программы, так как задача требует одновременно и возможности более детального исследования динамики ксенона на малых временах, и разрешения более длинных времен, например, для исследования выхода системы на стационар.

Газодинамический код должен быть устойчивым для любых шагов по времени. Порядок схемы должен быть не ниже второго, для моделирования важных физических эффектов на грубых сетках. Важным условием является возможность использования широкого набора доступных, хорошо зарекомендовавших себя генераторов сеток. Кроме того, требуется поддержка различных типов граничных условий. Схема должна удовлетворять условию консервативности, с заданной пользователем точностью.

Задачи такого типа являются ресурсозатратными с точки зрения времени работы программы. Характерные размеры сеток находятся в области 1–10 M ячеек, а количество шагов по времени может достигать порядка нескольких тысяч и более. Типичный пример может требовать расчета физического времени 1 s при характерном шаге по времени 1 ms. Реализация вычислений в рамках разумного времени достигается путем применения подхода параллельных вычислений. Поэтому код должен хорошо масштабироваться на большое количество процессоров. Кроме перечисленных сложностей, желательно иметь в наличии базовый набор инструментов для удобной обработки и анализа результатов расчетов. Предлагаемый нами газодинамический код обладает всеми этими свойствами.

4. Реализация

4.1. Решение системы уравнений газодинамики

Моделирование производится на основе среды с открытым исходным кодом для решения задач вычислительной гидродинамики OpenFOAM, с применением оригинального кода для решения системы уравнений модели (1)–(3). Интерфейс программы имеет стандартную для OpenFOAM реализацию и требует наличия входных данных по свойствам газа, сгенерированную сетку в подходящем для OpenFOAM формате, а также постановку начальных и граничных условий.

Устойчивость численной схемы обеспечивается применением гибридной явно-неявной схемы дискретизации по времени. Выбранные в задаче численные методы позволяют одновременно проводить расчеты как с низкими, так и с высокими числами Куранта ($C = \frac{u\Delta t}{\Delta x}$, где u — модуль скорости потока, Δt — шаг решения по времени, Δx — шаг по пространству) в различных частях расчетной области. Число Куранта используется для оценки условий устойчивости решения, является локальным свойством и различно в каждой ячейке: оно мало в областях с крупными ячейками и низкими скоростями потока, и велико в зонах с мелкими ячейками

и высокими скоростями. Предложенные в задаче методы эффективны для моделирования струи ксенона, где скорости течения и размеры сетки могут существенно различаться по пространству.

4.2. Получение спектров плазмы рабочего вещества

Как было указано выше, времена, соответствующие процессам в горячей плазме, на несколько порядков меньше гидродинамических и не разрешаются напрямую в этой задаче. Влияние горячей плазмы учитывается с помощью использования входных данных по спектру излучения плазмы, а также распределению ионов по энергиям и направлениям их разлета в полный телесный угол. На текущий момент предлагается использовать спектры, полученные с помощью RZLINE-кода, разработанного для моделирования радиационной гидродинамики горячей плазмы [8]. Дальнейшим направлением развития исследования может стать использование экспериментальных данных в качестве входных параметров.

4.3. Распространение высокоэнергетичных ионов

Спектр ионов плазмы содержит ионы различных энергий. В их число могут входить и высокоэнергетичные ионы с энергиями до 10 keV. Распространение таких ионов предлагается рассчитывать в два этапа. Расчет движения высокоэнергетичных ионов с учетом столкновительных процессов производится методами Монте–Карло. В процессе столкновений ионы постепенно теряют энергию. При достижении порога термализации ион исключается из фазы быстрых частиц и становится частью газа. В дальнейшем движение термализованного иона описывается системой уравнений газодинамики.

На этапе моделирования фазы быстрых частиц вероятностными методами требуются данные по сечениям столкновительных реакций между ионами Xe с фоновым газом и между собой. Необходимо учитывать реакции торможения, изотропного рассеяния, резонансной перезарядки и другие. Реакции, включающие обмен зарядом, имеют значение в задачах моделирования газовой защиты. Особое внимание необходимо уделять данным по реакциям остановки быстрых ионов в фоновом газе и другим процессам, отвечающим за обмен импульсом между частицами, так как они оказывают заметное влияние на вычисление температуры газа. Точность вычисления температуры важна в задачах моделирования тепловых нагрузок на элементы источника излучения, поэтому исследование и подбор таких сечений крайне актуальны.

4.4. Моделирование химии

Корректное описание многокомпонентной газовой смеси требует учета химических реакций в объеме камеры источника и на поверхностях установки. Для учета химических реакций модель содержит отдельный модуль. Для описания химической кинетики газовой смеси нужна база данных скоростей химических реакций в широком диапазоне температур (100–3000 K). Учет химических реакций разделяется на две задачи. Первая задача состоит в том, чтобы описать взаимодействие основных компонент газовой смеси между собой. Важными процессами здесь являются упругое рассеяние в фоновом газе, объемная и поверхностная рекомбинация ионов. Вторая задача направлена на описание взаимодействий газа с малыми примесями, к которым относятся H_2O и соединения углеродных примесей вида CH_x. На сегодняшний момент создание модели для ксенонового источника требует глубоких исследований в этих направлениях. При использовании других газов совместно с ксеноном базу данных по химическим реакциям необходимо будет расширять в зависимости от требований задачи.

5. Описание параметров для постановки численного эксперимента

Рассмотрим схему геометрии для решения задачи об источнике ЭУФ излучения с газоструйной ксеноновой мишенью. Возможный вид геометрии представлен на рисунке. Модельная геометрия состоит из входной камеры высокого давления, через которую контролируется напуск рабочего газа в основную камеру. Входная камера высокого давления может быть представлена коническим соплом. Область высокого давления соединяется с основным соплом, формирующим струю-мишень. Сопло переходит в основную камеру источника излучения с низким давлением. С противоположного от сопла конца камеры необходимо задать выходные отверстия. Диаметр сопла в узкой его части имеет размеры $d \propto 200-500\,\mu$m, длина сопла $l \propto 5$ mm, угол раствора лежит в интервале $\alpha \propto 3-9^\circ$. Размеры основной камеры значительно превышают размеры сопла и соответствуют оценке $L \propto 1$ m.

Рассмотрим граничные условия задачи. Граничные условия по скорости на входном отверстии задаются через массовый расход газа. Величина массового расхода контролирует натекание газа и установление давления во входной камере, которое в свою очередь будет определять плотность в струе на выходе из сопла. Возможно задание массового расхода как функции времени для обеспечения плавного установления режима течения. Наличие входной камеры высокого давления позволяет сдвинуть область граничных условий от основного сопла, тем самым снизить влияние погрешности вычисления на границе.

Давление на входном отверстии задается через условие Неймана, соответствующее равенству нулю градиента давления на границе. На выходе граничные условия

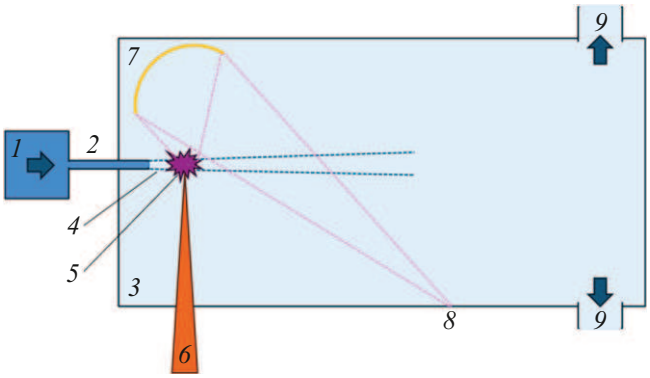

Схема для проведения расчета по установлению режима течения струи-мишени. *1* — входная камера высокого давления, *2* — сопло, *3* — основная камера, *4* — струя-мишень, *5* — плазма, *6* — лазер, *7* — зеркало, *8* — фокус, *9* — откачка.

для скорости и температуры задаются через равенство нулю соответствующих градиентов, в то время как давление выбирается фиксированным значением. Для стенок установки температура может быть зафиксирована, для давления выбран нулевой градиент, а скорость задана равной нулю, что соответствует условию отсутствия проскальзывания.

Следующий этап после общей постановки задачи предполагает настройку системы для проведения расчета. Необходимо подобрать подходящую по качеству сетку для вычислений, чтобы разрешение сетки позволило исследовать закономерности истекания струи из сверхзвукового сопла. Также требуется выбор оптимального шага по времени для проведения расчета по установлению режима потока струи без учета плазмы — холодной продувки камеры.

После получения установившегося течения можно переходить к исследованиям с плазмой, добавив источник плазмы в область истечения струи. Этап исследований с плазмой крайне важен для оптимизации установки источника, так как он позволит исследовать высокочастотные режимы работы источника. В том числе можно будет проводить предварительные расчеты для исследования тепловой нагрузки на элементы установки источника, вызванной импульсным режимом формирования плазмы

Заключение

Таким образом, в работе были обозначены направления исследований по оптимизации источника излучения с длиной волны 11.2 nm на основе плазмы ксенона. Предложен способ для дальнейшего газодинамического моделирования полных транспортных процессов в источнике с учетом плазмы и химической кинетики газовой смеси. Показаны общие принципы для реализации моделирования. Сформулированы этапы решения задачи. Дальнейшее развитие модели может быть использовано для более сложных задач оптимизации геометрии и режимов работы источника.

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Список литературы

[1] Н.И. Чхало. Микроэлектроника, **53** (5), 375 (2024). DOI: 10.31857/S0544126924050038
[2] N.I. Chkhalo, K.V. Durov, A.N. Nechay, A.A. Perekalov, V.N. Polkovnikov, N.N. Salashchenko. J. Surface Investigation: X-ray, Synchrotron and Neutron Techniques, **17**, S226 (2023). DOI: 10.1134/S1027451023070078
[3] Д.Б. Абраменко, П.С. Анциферов, Д.И. Астахов, А.Ю. Виноходов, И.Ю. Вичев, Р.Р. Гаязов, А.С. Грушин, Л.А. Дорохин, В.В. Иванов, Д.А. Ким, К.Н. Кошелев, П.В. Крайнов, М.С. Кривокорытов, В.М. Кривцун, Б.В. Лакатош, А.А. Лаш, В.В. Медведев, А.Н. Рябцев, Ю.В. Сидельников, Е.П. Снегирев, А.Д. Соломянная, М.В. Спиридонов, И.П. Цыгвинцев, О.Ф. Якушев, А.А. Якушкин. УФН, **189**, 323 (2019). DOI: 10.3367/UFNr.2018.06.038447
[4] D. Astakhov, V. Konovalov, I. Vichev, M. Kraposhin, Yu. Mankelevich, V. Ivanov, I. Popov, A. Ziganshin, D. Labetsky, V. Medvedev, A. Yakunin, R. Boot, K. Feenstra. 2016 Intern. Workshop on EUV and Soft X-Ray Sources, S31 (2016). https://www.euvlitho.com/2016/S31.pdf
[5] V. Konovalov, V. Novikov, V. Ivanov, K. Koshelev, A. Yakunin, V. Banine. 2013 Intern. Workshop on EUV and Soft X-Ray Sources, S43 (2013). https://www.euvlitho.com/2013/S43.pdf
[6] G. Kooijman. *Thesis*, FOM Institute (2003).
[7] А.В. Сидоров, А.П. Веселов, А.В. Водопьянов, А.А. Мурзанев, А.Н. Степанов. ЖТФ, **94**, 04 (2024). DOI: 10.61011/JTF.2024.07.58335.135-24
[8] K. Koshelev V.V. Ivanov, V.G. Novikov, V. Medvedev, A.S. Grushin, V.M. Krivtsun. J. Micro Nanolithogr. MEMS MOEMS **11**, 021112 (2012).