МОДЕЛИРОВАНИЕ СТРУЙНЫХ ТЕЧЕНИЙ ДЛЯ ГАЗОВЫХ ЛАЗЕРОВ

КОРЕПАНОВ М. А., КОРОЛЕВА М. Р., МОРАР Г.

Удмуртский федеральный исследовательский центр Уральского отделения РАН,
426067, Ижевск, ул. Т. Барамзиной, 34

АННОТАЦИЯ. Рассмотрено течение инертного газа (криптона) в модельной установке, предназначенной для исследования лазерно-плазменного источника экстремального ультрафиолетового (EUV) излучения с газоструйной мишенью. В среде OpenFOAM проведено численное моделирование течения вязкого теплопроводного газа в двухмерной осесимметричной постановке. Параметрическим моделированием показано, что плотность газа в скачке уплотнения прямо пропорционально давлению торможения криптона.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: сверхзвуковое сопло, вакуумная камера, газоструйная мишень, криптон, численное моделирование.

Постоянно растущие требования к миниатюризации и снижению энергопотребления различными радиоэлектронными устройствами заставляют производителей совершенствовать технологические процессы создания микроэлектроники. Центральное место в современной технологии изготовления изделий микроэлектроники занимает фотолитография, представляющая собой процесс избирательного травления поверхностного слоя с использованием защитной фотомаски. Наименьшие размеры деталей рисунка, достижимые в фотолитографии, определяются: длиной волны используемого излучения.

В настоящее время в качестве основных рассматриваются EUV (extreme ultraviolet) источники излучения с длиной волны около 13,5 нм. Одним из вариантов источника EUV излучения рассматривается газоплазменный лазер на инертных газах (криптон, ксенон) [1]. Одной из основных проблем на пути создания новой технологии является получение источника EUV-излучения достаточно высокой мощности с максимально возможной эффективностью конверсии. Однако в случае использования газовой мишени выход коротковолнового излучения из плазмы зависит от плотности газа в мишени, а повышение плотности газа в мишени ведет к повышению плотности периферического газа и тем самым к увеличению нежелательного самопоглощения излучения [2]. Таким образом, газовая мишень должна иметь достаточную плотность в ядре, но при этом низкую в периферийной части. Существенную помощь в оптимизации газовой мишени может оказать численное моделирование.

В качестве примера экспериментальной установки, предназначенной для исследования лазерно-плазменного источника EUV излучения с газоструйной мишенью, можно принять устройство, описанное в работе [1]. Установка представляет собой вакуумную камеру, давление в которой поддерживается на уровне не выше 10^{-2} Па. Газовая мишень создается вдувом в объем вакуумной камеры инертного газа через сопло диаметром от нескольких десятков до нескольких сот микрометров. Для того, чтобы обеспечить необходимую плотность газа в мишени, было предложено создать скачок уплотнения за счет взаимодействия струй.

Течение газа в подобной установке обладает двумя основными особенностями: во-первых, из-за малых размеров сопел очень большую роль в формировании течения будет играть вязкость газа, во-вторых, из-за истечения в вакуум газ будет очень сильно расширяться, что приведет к падению температуры до очень низких значений, в результате чего в газовом потоке возможно протекание процессов конденсации.

В данной работе рассматривается течение вязкого теплопроводного газа [3]. Моделирование течения проводилось в двумерной осесимметричной постановке, с допущениями об односкоростной и однотемпературной среде, что можно обосновать малостью частиц зарождающейся фазы, как правило размер капелек конденсата при конденсации инертных газов в соплах при аналогичных условиях составляет не более 100 Å [4]. Система уравнений в цилиндрических координатах будет иметь вид:

- уравнение неразрывности:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} r \rho v + \frac{\partial}{\partial z} \rho u = 0, \quad (1)$$

- уравнения импульса:

$$\frac{\partial}{\partial t} r \rho u + \frac{\partial}{\partial r} r \rho uv + \frac{\partial}{\partial z} r \rho u^2 = -r \frac{\partial P}{\partial z} + r \frac{\partial \tau_{ij}}{\partial z}, \quad (2)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} r \rho v + \frac{\partial}{\partial r} r \rho v^2 + \frac{\partial}{\partial z} r \rho uv = -\frac{\partial r P}{\partial r} + r \frac{\partial \tau_{ij}}{\partial r}, \quad (3)$$

где τ_{ij} – тензор напряжений, подробное описание компонентов которого можно найти в [5],

- уравнение сохранения энергии:

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t} r \rho E + \frac{\partial}{\partial r} r \rho v E + \frac{\partial}{\partial z} r \rho u E = \\ = -\frac{\partial}{\partial r} r v P - \frac{\partial}{\partial z} r u P + \frac{\partial}{\partial r} r k \frac{\partial T}{\partial r} + \frac{\partial}{\partial z} r k \frac{\partial T}{\partial z} + r \frac{\partial v \tau_{ij}}{\partial r} + r \frac{\partial u \tau_{ij}}{\partial z} + r \dot{m} h_f, \end{aligned} \quad (4)$$

где k – коэффициент теплопроводности газа, h_f – теплота фазового перехода, $\dot{m}$ – массовая скорость конденсации;

- замыкающие уравнения для температуры и давления:

$$T = \frac{1}{C_v} \left(E - \frac{W^2}{2} \right), \quad (5)$$

$$P = \rho R T. \quad (6)$$

Для предварительных расчетов было принято допущение о пренебрежимой малости скорости конденсации, т.е. $\dot{m}=0$.

Для моделирования были приняты следующие размеры конического сопла: радиус входа 0,14 мм, радиус выхода 1,2 мм, длина сопла 5 мм. Давление торможения от 2 до 10 бар, температура торможения 298 К. В качестве рабочей среды был принят криптон. Вязкость криптона определялась в соответствии с рекомендациями [6]. Моделирование проводилось в среде OpenFOAM.

Результаты расчетов (поля давления, температуры и числа Маха) для давления торможения 5 бар представлены на рис. 1 – 3. На рисунках виден скачок уплотнения, который сформировался на расстоянии примерно 5 мм от выхода из сопла, как результат взаимодействия встречных струй. Для упрощения расчетов на правой границе было поставлено условие отражения.

В таблице приведены значения плотности газа в скачке уплотнения от давления торможения потока. Из таблицы видно, что плотность газа в скачке линейно зависит от давления торможения.

Рис. 1. Поле давления

Рис. 2. Поле температур

Рис. 3. Поле числа Маха

Таблица

Зависимость плотности газа в скачке уплотнения от давления торможения

Давление торможения, бар	Плотность, кг/м ³
2	0,137585
3	0,205784
5	0,35267
7	0,493382
10	0,705971

Таким образом, можно отметить, что проведенные численные исследования подтверждают возможность создания газовой мишени для лазерно-плазменного источника EUV излучения и управления ее свойствами варьируя входные параметры потока – давление и температуру торможения.

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (Проект № 20-08-00481_а).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Vodopyanov A. V., Sidorov A. V., Razin S. V., Sidorov D. S., Luchinin A. G., Fokin A. P., Tsvetkov A. I., Veselov A. P., Glyavin M. Yu., Golubev S. V. A point-like plasma, sustained by powerful radiation of terahertz gyrotrons, as a source of ultraviolet light // 2017 42nd International Conference on Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves (IRMMW-THz).
2. Левашов В. Е., Медников К. Н., Пирожков А. С., Рагозин Е. Н. Оптимизация лазерно-плазменного источника мягкого рентгеновского излучения, возбуждаемого в импульсной струе ксенона // Квантовая электроника. 2006. Т. 36, № 6. С. 549-552.
3. Липанов А. М. Теоретическая гидромеханика ньютоновских сред. М.: Наука, 2011. 551 с.
4. Данильченко А. Г., Коваленко С. И., Самоваров В. Н. Экспериментальная проверка соотношения Хагены для больших кластеров, сформировавшихся в коническом сопле // Письма в Журнал технической физики. 2008. Т. 34, № 23. С. 87-94.

5. Лойцянский Л. Г. Механика жидкости и газа. М.: Дрофа, 2003. 840 с.
6. Рид Р., Праусниц Дж., Шервуд Т. Свойства газов и жидкостей. Справочное пособие. Пер. с англ., под ред. Б. И. Соколова. 3-е изд., перераб. и доп. Л.: Химия, 1982. 592 с.
-

Simulation of jet flows for gas lasers

Korepanov M. A., Koroleva M. R., Morar G.

Udmurt Federal Research Center UB RAS, Izhevsk, Russia

SUMMARY. An inert gas (krypton) flow is considered in a experimental device designed to study a laser-plasma source of extreme ultraviolet (EUV) radiation with a gas-jet target. Using OpenFOAM software a numerical simulation of the flow of a viscous heat-conducting gas in a two-dimensional axisymmetric formulation is performed. The effect of gas parameters at the nozzle inlet on the characteristics of a gas target is studied. It has been shown by parametric modeling that the gas density in the shock wave is directly proportional to the krypton pressure at the nozzle inlet.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: supersonic nozzle, vacuum chamber, gas-jet target, krypton, numerical simulation.

REFERENCES

1. Vodopyanov A. V., Sidorov A. V., Razin S. V., Sidorov D. S., Luchinin A. G., Fokin A. P., Tsvetkov A. I., Veselov A. P., Glyavin M. Yu., Golubev S. V. A point-like plasma, sustained by powerful radiation of terahertz gyrotrons, as a source of ultraviolet light. *2017 42nd International Conference on Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves (IRMMW-THz)*. <https://doi.org/10.1109/IRMMW-THz.2017.8067071>
 2. Levashov V. E., Mednikov K. N., Pirozhkov A. S., Ragozin E. N. Optimisation of a laser-plasma soft X-ray source excited in a pulsed xenon jet. *Quantum Electronics*, 2006, vol. 36, no. 6, pp. 549-552. <https://doi.org/10.1070/QE2006v036n06ABEH013163>
 3. Lipanov A. M. *Teoreticheskaya gidromekhanika n'yutonovskikh sred* [Theoretical hydromechanics of Newtonian media]. Moscow: Nauka Publ., 2011. 551 p.
 4. Danylchenko O. G., Kovalenko S. I. & Samovarov V. N. Experimental verification of the Hagen relation for large clusters formed in a conical nozzle. *Technical Physics Letters*, 2008, vol. 34, no. 12, pp. 1037-1040. <https://doi.org/10.1134/S1063785008120146>
 5. Loytsyanskiy L. G. *Mekhanika zhidkosti i gaza* [Fluid and gas mechanics]. Moscow: Drofa Publ., 2003. 840 p.
 6. Reid R. C., Prausnitz J. M., Sherwood T. K. *The properties of gases and liquids*. Third edition. New York: McGraw-Hill, 1977, 688 p.
-

Корепанов Михаил Александрович, доктор технических наук, доцент, ведущий научный сотрудник, УдмФИЦ УрО РАН, e-mail: kma@udman.ru

Королева Мария Равиелевна, кандидат физико-математических наук, доцент, старший научный сотрудник, УдмФИЦ УрО РАН, e-mail: koroleva@udman.ru

Морар Габриела, инженер УдмФИЦ УрО РАН