

МОДЕЛИРОВАНИЕ ИСТЕЧЕНИЯ ВЯЗКОГО ГАЗА ИЗ СОПЛА ЛАВАЛЯ

Цель работы — построение вычислительной модели газовой мишени, используемой в лаборатории микроэлектроники ФТИ им. А.Ф. Иоффе для создания плазменного источника EUV (Extra Ultraviolet) излучения. Газовая мишень представляет собой сверхзвуковую струю ксенона, истекающую из сопла Лавалья в вакуумированную камеру.

Исследование проводилось в рамках модели сплошной среды в стационарной постановке, рассматривалось плоское однофазное ламинарное течение сжимаемого газа. Задача решалась численно методом конечных объёмов с применением коммерческого пакета ANSYS CFX, при этом использовалась численная схема, обеспечивающая второй порядок аппроксимации по пространству. Для решения использовалась расчётная сетка, состоящая из 35000 узлов. Было показано, что эта сетка достаточна для получения сошедшегося по сетке (ошибка менее 5%) решения.

Поскольку экспериментальная установка работает в импульсном режиме, истечение происходит в сильно разреженную среду и сопровождается сильным расширением и охлаждением газа. Необходимо оценить возможное влияние нестационарности, конденсации, а также обосновать использование приближения сплошной среды. В работе показано, что время установления течения внутри сопла много меньше (на три порядка) длительности импульса установки. Также установлено, что локальное число Кнудсена существенно меньше 1 (не превышает 6×10^{-2}), следовательно, среду можно считать сплошной. В переохлаждённом состоянии газ находится очень малое время, поэтому предположение о несущественности влияния фазовых превращений можно считать оправданным.

В силу малости числа Рейнольдса ($Re = 162$) течение имеет существенно вязкий характер. Так, пограничные слои, нарастающие на стенках сопла, занимают около 40% диаметра сопла на срезе. Это приводит к заметному уменьшению расхода по сравнению с элементарной одномерной теорией (в 3.5 раза). Важно также отметить сильные изменения в значениях локального числа Маха: так, на срезе сопла значение числа M достигает 4.5, а на границе расчетной области (в камере за соплом) $M = 11.5$.

Наиболее важной характеристикой газовой мишени является распределение плотности за соплом (рис. 1), поскольку эта характеристика напрямую влияет на мощность плазменного источника EUV излучения. Установлено заметное падение плотности: на расстоянии двух выходных радиусов плотность падает на 10%, а на расстоянии пяти радиусов — в два раза.

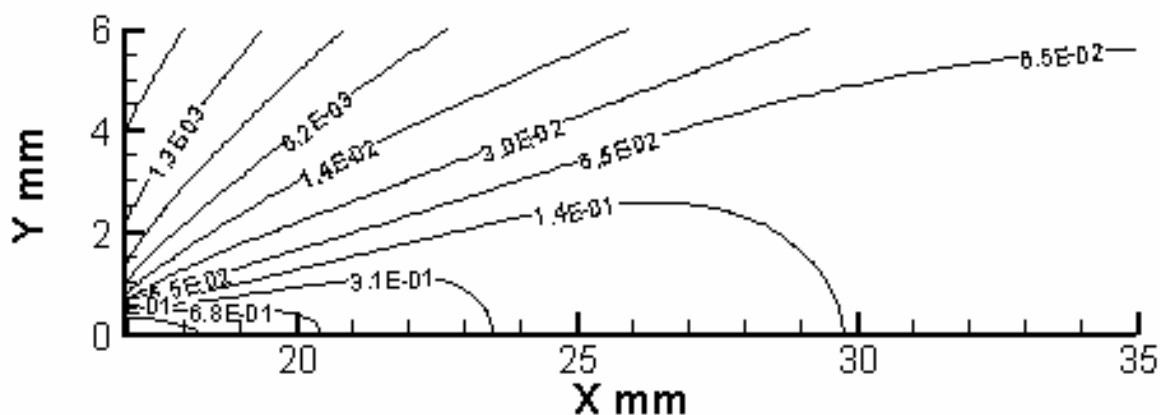


Рис. 1. Распределение плотности (относённой к плотности на срезе сопла) в течении за соплом

Таким образом, была создана физически обоснованная численная модель газовой мишени, имеющая вычислительную погрешность, не превышающую 5%. На основе этой модели были выполнены пробные расчеты, с помощью которых было показано, что для повышения мощности плазменного источника света необходимо воздействовать на струю на возможно близком расстоянии от среза сопла.