

СЕКЦИЯ «ТВЕРДОТЕЛЬНАЯ ЭЛЕКТРОНИКА»

УДК 621.312

А.М.Алексеев, В.А.Горелов (3 курс, каф. ТТЭ), Р.П.Сейсян, д.ф.-м.н., проф.,

С.Г.Калмыков, к.ф.-м.н., с.н.с. ФТИ им. А.Ф.Иоффе РАН

ЛАЗЕРНАЯ ПЛАЗМА ДЛЯ НАНОЛИТОГРАФИИ – ПРОСТАЯ МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ И СРАВНЕНИЕ С ЭКСПЕРИМЕНТОМ

В работе исследуется возбуждаемая на поверхности молибденовой мишени лазерная плазма как источник света для нанолитографии. Цель работы – получение пространственно-временных и спектральных характеристик излучения лазерной искры на Экспериментальном Стенде ФТИ, количественное определение коэффициента конверсии лазерного излучения в EUV (Extreme UltraViolet – ДВУФ – Дальний Вакуумный УльтраФиолет). Методика – время-разрешенные и спектрально-разрешенные измерения интенсивности излучения лазерной плазмы и ее вариаций в пространстве, численное моделирование поведения плазмы и ее излучения при помощи простой математической модели с минимальным набором произвольных параметров, сравнение экспериментальных и расчетных результатов.

Экспериментальная установка – Экспериментальный Стенд ФТИ [1], предназначенный для экспонирования неорганических фоторезистных пленок, потенциально пригодных для применения в EUV фотолитографии с разрешением нанометрового масштаба, на длинах волн 193 нм (излучение ArF лазера) и 13.4 нм (излучение плазмы).

В состав установки входят:

- импульсный эксимерный ArF/KrF лазер, $\lambda = 193/248$ нм, $E_{\text{имп.}} = 150-400$ мДж, $\tau_{\text{имп.}} = 20-30$ нс;
- измеритель энергии лазерного импульса фирмы Gentec;
- вакуумная камера с 2-мя иллюминаторами (один из них – кварцевый и служит для ввода излучения лазера, другой – из простого стекла для наблюдения), в которой расположен разработанный в ФТИ дистанционно управляемый конвертор излучения с подвижной Mo мишенью; кварцевый объектив, фокусирующий излучение лазера на мишень конвертора; вогнутое сферическое интерференционное зеркало, $\lambda = 134 \text{ \AA}$, $\Delta\lambda = 5-7 \text{ \AA}$, $D = 100$ мм, $F = 150$ мм, направляющее EUV излучение плазмы на фоторезистный образец; позиционер образца с точностью установки X-Y координат – 10 мкм; чувствительный к EUV, абсолютно калиброванный Si фотодиод разработки ФТИ;
- блок откачки камеры до рабочего вакуума порядка 10^{-5} мм рт. ст.;
- фотоэлемент ФЭК-29 для регистрации излучения плазмы в видимом и ближнем ультрафиолетовом диапазоне;
- осциллограф Tektronix TDS 2022 для измерения сигналов фотодатчиков и записи их в электронную память.

Работа находится в начальной стадии, проведены первые эксперименты:

- определение задержки и разброса импульса генерации лазера относительно импульса синхронизации, запускающего газовый разряд в камере лазера;
- осциллографирование импульса лазера;

- фотографирование в видимом свете лазерной искры с целью оценки ее размеров и условий наилучшей фокусировки излучения лазера на мишень конвертора;
- осциллографирование свечения плазмы в видимом и ближнем ультрафиолетовом диапазоне.

Получены следующие экспериментальные результаты:

- импульс генерации лазера задержан относительно импульса синхронизации на 1.8 мксек. с разбросом ± 13 нсек.;
- полная длительность светового импульса KrF лазера – 22-25 нсек., длительность переднего фронта – не больше 3 нсек.;
- определено оптимальное расстояние мишени конвертора от фокусирующего объектива для наилучшей фокусировки, которое соответствует расчетным данным; видимые размеры светящейся плазмы в поздних стадиях ее существования составляют $\approx 2 \times 6$ мм² в плоскости мишени и ≈ 2 -3 мм по высоте, хотя размеры фокального пятна – порядка десятых долей миллиметра;
- видимое излучение плазмы квазистационарно в течение действия лазерного импульса и спадает после его окончания с характерным временем около 100-200 нсек..

Использовалась следующая математическая модель:

- 0-мерный, нестационарный тепловой баланс полусферической лазерной плазмы;
- моделируемые функции – температура плазмы и интенсивность ее излучения;
- температуры ионов и электронов плазмы одинаковы;
- граница плазмы расширяется с тепловой скоростью ионов;
- механизм нагрева – поглощение излучения лазера с коэффициентом $\alpha \leq 1$, механизмы охлаждения – чернотельное излучение с коэффициентом серости $\beta \leq 1$, $\alpha \neq \beta$, и адиабатическое охлаждение;
- уравнение теплового баланса плазмы: $C_{pl}(dT/dt) = P_{laser} - (\sigma T^4 + nkTv_i)(2\pi r^2)$, где T , P_{laser} , n , v_i и r – функции времени;
- параметры задачи – размеры фокального пятна на мишени, глубина проникновения тепловой волны в материал мишени, число частиц плазмы (т.е. количество испаренного и ионизированного материала мишени), средняя степень ионизации, коэффициенты α и β .

Проведена верификация модели. Показано, что все члены уравнения близки по порядку величины друг к другу, и ни одним из них нельзя пренебречь. При отсутствии охлаждения нагрев плазмы импульсом лазера до ожидаемых температур в несколько десятков эВ происходит за несколько наносекунд.

Составлен алгоритм решения задачи, написана программа ядра задачи на языке Фортран и выполнена отладка. Проведено тестирование программы, показавшее разумное согласие с физическими представлениями о поведении температуры плазмы во времени.

ЛИТЕРАТУРА:

1. R.P.Seisyan. Proc. of 31st Japan Workshop on Advanced EUV Tech. in Russia. Tokyo, Oct. 2004.