

07;12

Новый метод определения эффективности конверсии лазерного излучения в диапазоне длин волн 13.5 ± 0.3 nm для источников на основе лазерной плазмы

© И.В. Домрачева, М.В. Петренко, З.А. Степанова,
Г.К. Тумакаев, С.В. Бобашев

Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН, С.-Петербург
E-mail: inga.domracheva@mail.ioffe.ru

Поступило в Редакцию 16 марта 2007 г.

Проведены эксперименты по регистрации дальнего вакуумного ультрафиолетового излучения (Extreme UltraViolet, далее EUV) от газоструйного источника, использующего в качестве мишени сверхзвуковую струю ксенона. Измерены зависимости энергии EUV излучения от энергии лазерного импульса на сверхзвуковой струе ксенона, а также на металлических мишенях (Cu, Mo, Ta). На основании полученных результатов предложен новый метод определения эффективности конверсии лазерного излучения в EUV диапазон, позволяющий однозначно характеризовать свойства мишеней различных материалов. Обсуждаются пути оптимизации газоструйного ксенонового источника.

PACS: 52.38-г.

В настоящее время наиболее перспективным источником мягкого рентгеновского излучения с длиной волны 13.5 nm, применяемого в современной литографии, является источник на основе лазерной плазмы [1–3]. Эффективность источника обычно характеризуется коэффициентом конверсии (КК), определяемым как отношение энергии генерируемого EUV излучения (E_{EUV}) к энергии лазерного импульса (E_{las}):

$$КК = \frac{E_{EUV}}{E_{las}}. \quad (1)$$

Коэффициент конверсии не позволяет однозначно описать излучательные свойства плазмы лазерной искры, а характеризует свойства

конвертора в целом. Действительно, в настоящее время наблюдается существенный разброс значений коэффициентов конверсии, лежащих в пределах от 10^{-6} до 2% [4–6].

В работе предложен экспериментальный метод определения эффективности конверсии лазерного излучения в диапазон длин волн 13.5 ± 0.3 nm, основанный на учете излучательной способности плазмы лазерной искры. Исследования проводились на установке, состоящей из оптической системы, вакуумной камеры с регистрирующим фотодиодом, а также системы электропитания и управления. Оптическая система включает в себя твердотельный лазер на неодимовом стекле, два усилителя, систему зеркал точной настройки и фокусирующих линз. Лазер обладает следующими параметрами: длина волны $\lambda = 1.06$ μm , энергия одиночного импульса $E = 0.1 \div 1$ J, длительность импульса $\tau = 40 \div 50$ ns. Фокусировка лазерного излучения на мишень производится с помощью линзы с фокусным расстоянием $f = 111$ mm, обеспечивающей размер фокусного пятна $d = 0.1$ mm и плотность потока лазерного излучения в фокусе $S = 10^{11} \div 10^{12}$ W/cm². Узел мишени сконструирован таким образом, что возможно проведение экспериментов как на твердотельных металлических мишенях, так и в сверхзвуковой струе газа ксенона. Для выделения EUV с длиной волны 13.5 nm используются многослойное Mo–Si зеркало нормального падения ($\lambda = 13.5$ nm, $\Delta\lambda = 0.35$ nm, угол падения $\theta = 83^\circ$, коэффициент отражения $R = 45\%$), а также тонкопленочные Mo–Si рентгеновские фильтры с коэффициентом пропускания 36%. Для регистрации EUV излучения служит рентгеновский фотодиод SPD-12UVHS [7], разработанный в ФТИ им. А.Ф. Иоффе РАН и обеспечивающий проведение измерений абсолютной энергии мягкого рентгеновского излучения.

Проведена серия экспериментов по определению зависимости эффективности конверсии лазерного излучения в EUV диапазон от энергии лазерного импульса. На рис. 1 приведены полученные экспериментальные зависимости энергии зарегистрированного EUV излучения для твердотельных металлических мишеней (молибдена, тантала и меди), а также для сверхзвуковой струи ксенона. Как видно из рис. 1, при энергиях лазерного излучения, превышающих некоторое значение E_0 , экспериментальные точки с хорошей степенью точности можно аппроксимировать линейной зависимостью. Наличие граничного значения энергии E_0 свидетельствует о пороговом характере конверсии излучения, точнее, о пороговом характере генерации EUV излучения. Таким образом, энергия E_0 — это энергия, необходимая для создания

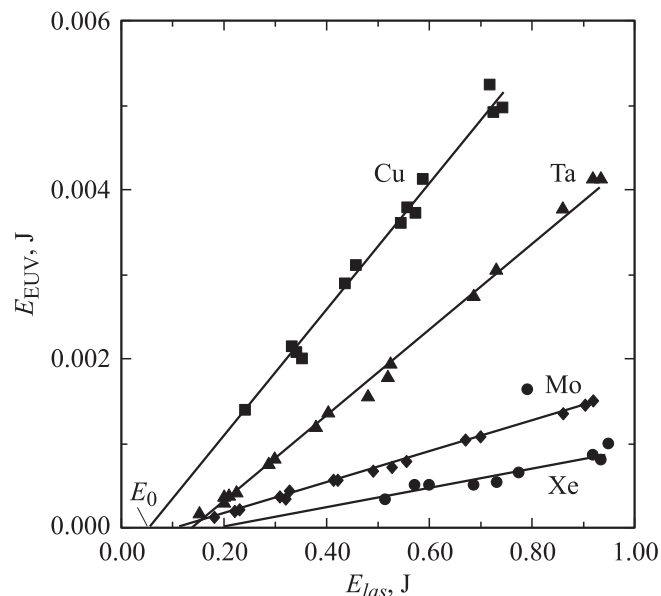


Рис. 1. Зависимость энергии EUV излучения от энергии лазерного импульса для металлических мишеней (Cu, Ta, Mo) и сверхзвуковой струи Xe.

плазмы, эффективно излучающей в исследуемом диапазоне. Рассмотрены процессы, имеющие место в процессе взаимодействия лазерного излучения с мишенью и приводящие к формированию такой плазмы, и оценены их энергоёмкости. Проведены оценки вклада энергии лазера в каждый из процессов, ведущих к образованию плазмы. Вклад энергии в процессы нагрева, плавления и испарения мишени крайне мал. Таким образом, пороговая энергия генерации EUV излучения связана с процессами оптического пробоя, нагрева плазмы лазерным излучением и образования многозарядных ионов.

При этом необходимо заметить, что эффективное излучение в EUV диапазоне имеет место только после достижения определенной степени ионизации вещества, а постоянство конверсии — только после установления равновесия между нагревом плазмы лазерным излучением и излучением плазмой EUV.

При определении эффективности конверсии лазерного излучения в EUV диапазон через коэффициент конверсии не принимаются во

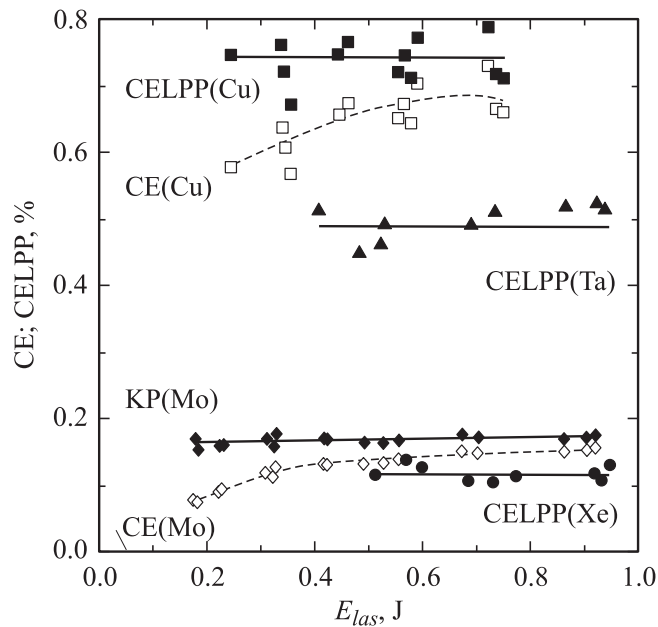


Рис. 2. Экспериментальные значения коэффициентов преобразования (КП) и коэффициентов конверсии (КК) для Cu, Ta, Mo и Xe.

внимание процессы образования плазмы. Это непосредственно следует из выражения (1). Таким образом, коэффициент конверсии описывает свойства системы в целом, что выражается в его зависимости от энергии лазерного импульса и, как следствие, ведет к значительной неоднозначности в определении коэффициента конверсии.

Введем понятие коэффициента преобразования (КП) плазмы лазерной искры. Определим его как отношение энергии EUV излучения к энергии лазерного импульса за вычетом E_0 :

$$\text{КП} = \frac{E_{\text{EUV}}}{E_{\text{las}} - E_0}. \quad (2)$$

Именно коэффициент преобразования характеризует излучательную способность плазмы. Он имеет постоянное значение при установившемся режиме генерации, что непосредственно следует из рис. 1 и 2.

На рис. 2 приведены полученные значения КП для разных материалов мишеней. Такой коэффициент не зависит от энергии лазерного импульса, имеет постоянное значение и характеризует излучательные свойства плазмы в данном спектральном диапазоне. Полученные значения КП составляют: для меди — 0.74%, для тантала — 0.51, для молибдена — 0.17, для ксенона — 0.12%.

Здесь же представлены экспериментальные значения КК, являющегося, согласно (1), КПД конвертора в целом. Данные указывают на зависимость КК от энергии лазера, его значение в области энергий лазерного импульса, превышающих E_0 , стремится к постоянной величине, а именно к значению КП.

Эффективность конверсии лазерного излучения определяется излучательной способностью плазмы лазерной искры в EUV диапазоне. Излучательные свойства вещества можно описать, используя связь между коэффициентами поглощения и излучения. Зная поглощение плазмой собственного излучения, можно определить ее максимальную излучательную способность в заданном спектральном диапазоне.

На рис. 3 приведена поглощательная способность в относительных единицах (по отношению к меди) для различных элементов, рассчитанная для газового облака с концентрацией $3.5 \cdot 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ и характерным размером плазменного облака $100 \mu\text{m}$ [8]. При этом предполагалась одинаковая поглощательная способность плазмы и паров вещества. На этот же график нанесены экспериментально полученные значения КП, отнесенные к КП меди. Видно хорошее совпадение экспериментальных результатов и численных оценок для твердотельных металлических мишеней. Таким образом, использование данного метода позволяет оценить излучательную способность в EUV диапазоне лазерной плазмы, образованной на твердотельных мишенях.

Однако экспериментально полученный коэффициент преобразования для сверхзвуковой струи ксенона ниже коэффициента преобразования, полученного для меди, хотя, согласно рис. 3, ксенон должен обладать большей излучательной способностью. Это обусловлено низкой концентрацией ксеноновой мишени, что приводит к менее эффективному поглощению лазерного излучения в газе и в плазме лазерной искры. Другим фактором, влияющим на излучательные свойства источника, является газовое облако вокруг лазерной искры, поглощающее генерируемое EUV излучение. Увеличение концентрации газовой мишени и уменьшение роли периферийной области сверхзвуковой струи позволят

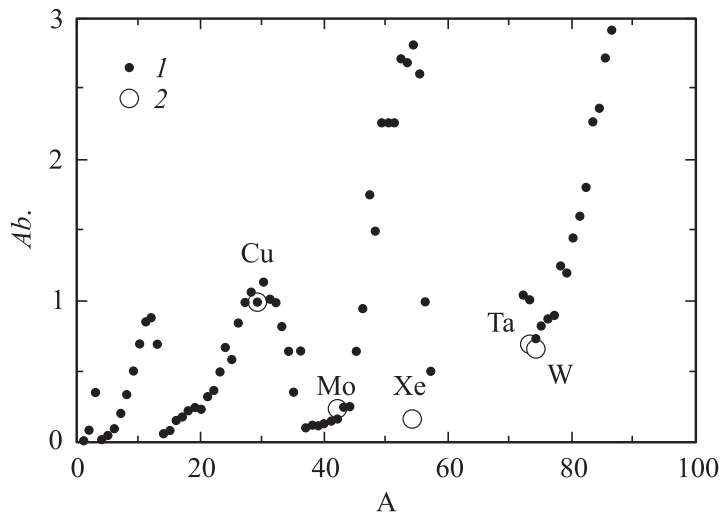


Рис. 3. Относительная поглощательная способность излучения в EUV диапазоне для различных элементов (1). Экспериментальные значения КП для Cu, Mo, Ta и Xe (2). A — атомный номер.

повысить эффективность газоструйного лазерно-плазменного источника EUV излучения.

В работе исследована излучательная способность лазерно-плазменного источника EUV излучения. Получены экспериментальные зависимости энергии генерируемого EUV излучения от энергии лазерного импульса для различных материалов мишени. Анализ полученных результатов показал существование пороговой энергии генерации EUV излучения E_0 , связанной с процессами образования эффективно излучающей лазерной плазмы. Предложен и обоснован новый метод определения эффективности конверсии лазерного излучения в EUV диапазон. Определено понятие коэффициента преобразования плазмы лазерной искры (КП), характеризующего излучательные свойства плазмы. Предложен метод оценки излучательной способности плазмы лазерной искры в заданном спектральном диапазоне. Экспериментальные результаты совпадают с численными оценками.

Работа поддержана грантами МНТЦ № 0991, РФФИ 06-08-01230-а и Программой президиума РАН П09.

Список литературы

- [1] *Stamm U., Schwörer H., Lebert R.* // Physik Journal. 2002. V. 1. N 12. P. 33–39.
- [2] www.MPRonline.com
- [3] *Сейсян П.П.* // ЖТФ. 2005. Т. 75. В. 5. С. 1–13.
- [4] *Beg F.N., Moustazis S.D., Tatarakis M., Lee P., Dyson A., Dangor A.E.* // Journal of Physics D. Applied Physics. 1998. N 31. P. 2777–2782.
- [5] *Kondo K., Mori M., Shiraishi T.* // Applied Surface Science. 2002. N 197–198. P. 138–144.
- [6] *Richardson M., Koay C.-S., Takenoshita K., Keyser C., Al-Rabban M.* // J. Vac. Sci. Technol. B. 2004. V. 22. N 2. P. 785–790.
- [7] *Alekseyev A.G., Belov A.M., Zabrodsky V.V., Sukhanov V.L., Peterson B.J.* // Fast XUV 16X16 array hybrid module for plasma imaging applications // 16th International Toki Conference „Advanced Imaging and Plasma Diagnostics“. JAPAN, December 5–8, 2006.
- [8] http://www-cxro.lbl.gov/optical_constants/gastrn2.html