

04;07

Условия генерации излучения с длиной волны 13.5 nm лазерно-плазменным источником на сверхзвуковой струе ксенона

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

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

Поступило в Редакцию 11 января 2008 г.

Предложен и обоснован простой расчетный метод, позволяющий указать условия режима оптимальной генерации EUV излучения, а также рекомендовать направления решения проблемы эффективности источника. Учитываются основные процессы, имеющие место при взаимодействии лазерного излучения с газовой ксеноновой мишенью, ведущие к генерации излучения с длиной волны 13.5 nm. Показано, что одним из основных факторов, уменьшающих эффективность источника, является поглощение генерируемого излучения газом мишени. Проведены качественные расчеты условий генерации излучения с длиной волны 13.5 nm применительно к трем лазерам с различными длинами волн. Установлено, что наиболее перспективным представляется использование CO₂-лазера. Расчетное значение эффективности конверсии составляет величину порядка 3% в области давлений газа ксенона 10–15 mm Hg.

PACS: 52.38.-г

Разработка нанолитографа нового поколения является одной из наиболее актуальных задач современной прикладной науки. Для решения задачи уменьшения характерных минимальных размеров интегральных схем необходимо использовать коротковолновые источники излучения, а именно источники с длиной волны 13.5 nm [1]. Излучение в таком диапазоне длин волн принято называть экстремальным ультрафиолетом (англ. Extreme Ultra Violet, далее EUV).

Основными требованиями, предъявляемыми к источнику, являются его высокая интенсивность и отсутствие осколков (продуктов эрозии электродов или разлета материала мишени), загрязняющих рентге-

новскую оптику. Поэтому наиболее перспективным источником EUV излучения является плазма лазерной искры [2]. Основным недостатком такого источника является поглощение генерируемого излучения веществом, окружающим лазерную искру (рис. 1). График зависимости поглощающей способности ксенона для излучения с длиной волны 13.5 nm в зависимости от давления ксенона приведен на рис. 2. Так, в струе ксенона с давлением 50 mm Hg и диаметром 2 mm поглощается порядка 95–98% генерируемого EUV излучения. Следовательно, эффективность работы конвертора при таком давлении очень низка. Одним из способов повышения эффективности источника является, например, обжим ксеноновой струи внешней струей гелия [3].

Тем не менее необходимо заметить, что поиск оптимальных условий генерации EUV излучения достаточно несистематизирован [4]. Это связано с тем, что в настоящее время не существует общего подхода, позволяющего выделить основные закономерности влияния тех или иных факторов на характеристики источника.

Для решения задачи оптимизации источника излучения с длиной волны 13.5 nm был разработан инженерный алгоритм, позволяющий промоделировать процессы в лазерной искре и оценить выход EUV излучения из ксеноновой мишени. Учтены основные процессы, имеющие место при взаимодействии интенсивного лазерного излучения со сверхзвуковой струей ксенона [5]. Ими являются ионизация атомов и ионов электронным ударом, рекомбинация ионов, начальная ионизация атомов лазерным излучением [6], заселение и гибель возбужденных состояний, нагрев электронов в поле электромагнитной волны при упругих столкновениях с нейтральными атомами, нагрев электронов при свободно-свободных переходах в поле ионов, а также потеря энергии электронным газом в актах ионизации. Отметим, что в условиях малой длительности импульса (десятки наносекунд) в расчете можно пренебречь газодинамическим разлетом плазмы.

Известно, что излучение ксеноновой плазмы в области 13–14 nm формируется главным образом за счет переходов в ионах Xe^{10+} [7]. В рамках всех вышеперечисленных предположений был проведен расчет, позволяющий проследить во времени динамику появления зарядовых состояний Xe. Как видно из рис. 3, образованию ионов Xe^{+1} отвечает довольно длинный период начальной ионизации (более 20 ns от начала разогрева мишени). Затем темп генерации ионов с зарядами $Z \geq 2$ резко возрастает, и образование ионов с зарядовыми состояниями 2–9 занимает несколько наносекунд. Определяющим для

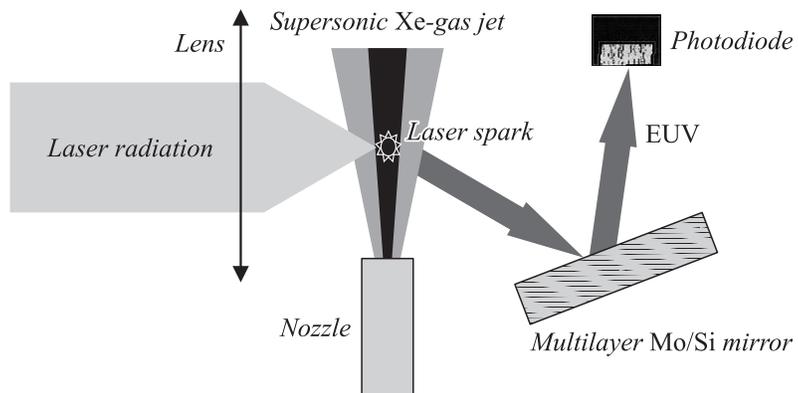


Рис. 1. Общая схема эксперимента: лазерная искра в сверхзвуковой струе ксенона.

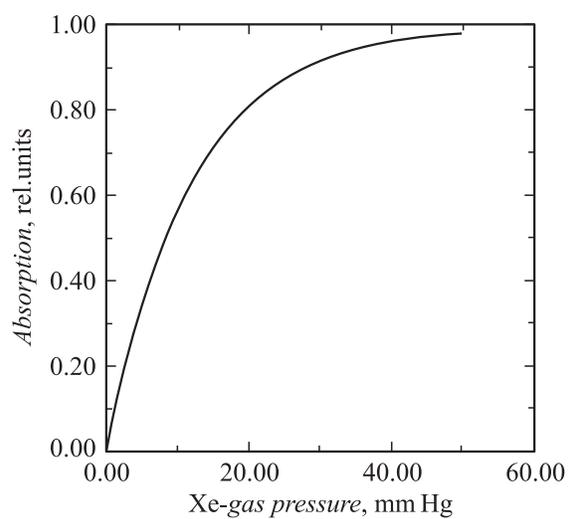


Рис. 2. Поглощательная способность ксенона для излучения с длиной волны 13.5 nm в зависимости от давления газа.

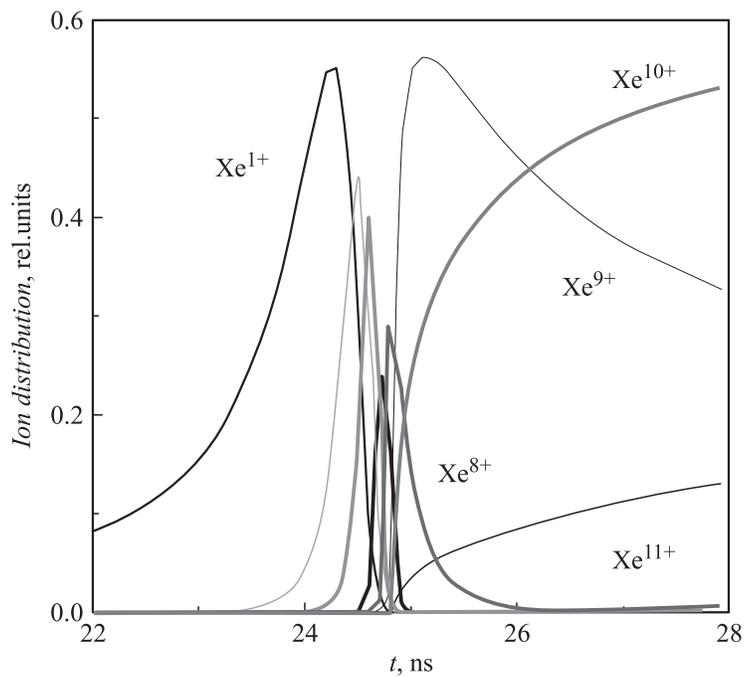


Рис. 3. Динамика ионизации лазерной искры в ксеноне ($Z = 1 \div 11$). Необозначенным кривым соответствуют ионы с зарядами 2–7. Условия генерации EUV излучения: энергия лазерного импульса 1 J, длительность импульса 50 ns, давление ксенона в струе 50 mm Hg.

режима генерации ионов Xe^{10+} является соотношение между энергией, идущей на нагрев плазмы, и энергией, уносимой излучением в рабочем диапазоне [8]. Если между нагревом и выносом EUV излучения устанавливается баланс, можно говорить о квазиравновесном состоянии плазмы и наиболее эффективной генерации EUV излучения. Если нагрев недостаточно эффективен, то число образовавшихся ионов с зарядом Xe^{10+} мало. При перегреве электронного газа максимум распределения ионов по зарядовым состояниям сдвигается в область с зарядами $Z > 10$.

Таким образом, с одной стороны, интенсивное поглощение EUV излучения окружающим лазерную искру ксеноном и, с другой стороны, перегрев плазмы лазерной искры и, как следствие, генерация ионов

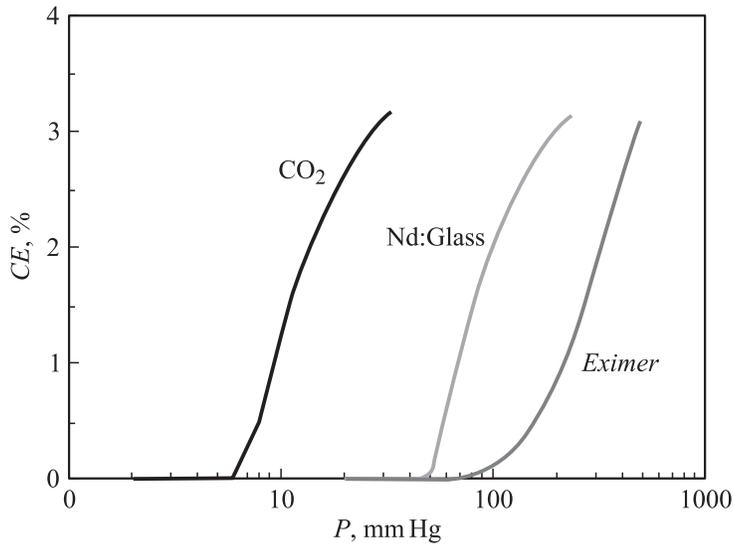


Рис. 4. Сравнение условий генерации EUV излучения с длиной волны 13.5 nm при использовании эксимерного лазера ($\lambda = 0.248 \mu\text{m}$), лазера на неодимовом стекле ($\lambda = 1.06 \mu\text{m}$) и CO_2 -лазера ($\lambda = 10.6 \mu\text{m}$).

ксенона с зарядом $Z > 10$ сужают условия эффективной работы газоструйного EUV конвертора.

Были проведены расчеты условий генерации излучения с длиной волны 13.5 nm применительно к трем длинам волн инициирующего лазерного излучения: для импульсного эксимерного лазера с длиной волны $\lambda = 0.248 \mu\text{m}$, импульсного твердотельного лазера на неодимовом стекле с длиной волны $\lambda = 1.06 \mu\text{m}$ и импульсного CO_2 -лазера с $\lambda = 10.6 \mu\text{m}$ [9]. На рис. 4 приведена зависимость эффективности генерации EUV излучения с длиной волны 13.5 nm от давления ксенона. Из анализа результатов следует, что значения одного и того же коэффициента конверсии для различных лазеров реализуются в разных диапазонах давлений газа. Например, коэффициент конверсии порядка 1% для CO_2 -лазера реализуется при давлении ксенона $p = 10 \text{ mm Hg}$, для лазера на неодимовом стекле — при $p = 70 \text{ mm Hg}$ и для эксимерного лазера — при $p = 200 \text{ mm Hg}$. При этом необходимо

учитывать, что с ростом давления растёт и поглощение генерируемого EUV излучения.

Использование CO₂-лазера возможно в области низких давлений, когда поглощение EUV излучения достаточно мало. Так, согласно нашим расчетам, применение CO₂-лазера позволит довести коэффициент конверсии до 3% в области давлений ксеноновой мишени 10–12 mm Hg. Таким образом, в целях получения максимального выхода излучения с длиной волны 13.5 nm с газовой ксеноновой мишени наиболее перспективным среди вышеперечисленных является CO₂-лазер с длиной волны 10.6 μm.

Работа поддержана грантами РФФИ 06-08-01230-а, РФФИ 07-08-12259-офи, а также Программой президиума РАН П09.

Список литературы

- [1] *Seysyan R.P.* // ZhTF. 2005. V. 75. N 5. P. 1–13.
- [2] *Bobashev S.V., Domracheva I.V., Petrenko M.V., Tumakaev G.K., Stepanova Z.A.* // Proceedings SPIE. 2007. V. 6614.
- [3] *Fiędorowicz H., Bartnik A., Daido H., Choi I.W., Suzuki M., Yamagami S.* // Optics Communications. 2000. V. 184. P. 161–167.
- [4] *Stamm U., Schwörer H., Lebert R.* // Physik Journal. 2002. V. 1. N 12. P. 33–39.
- [5] *Райзер Ю.П.* Лазерная искра и распространение зарядов. М.: Наука, 1974. 308 с.
- [6] *Делоне Н.Б., Крайнов В.П.* Нелинейная ионизация атомов лазерным излучением. М.: Физматлит, 2001. 312 с.
- [7] *Fahy K., Dunne P., McKinney L. et al.* // J. Phys. D: Appl. Phys. 2004. V. 37. P. 3225–3232.
- [8] *Зельдович Я.Б., Райзер Ю.П.* Физика ударных волн и высокотемпературных газодинамических явлений. М.: Наука, 1966. 688 с.
- [9] *Domracheva I., Tumakaev G., Stepanova Z., Petrenko M., Bobashev S.* // 15th International Conference on Vacuum Ultraviolet Radiation Physics. Berlin, Germany, July 29–August 3 2007.