

ИЗ ТЕКУЩЕЙ ЛИТЕРАТУРЫ

Лазерные источники в мягкой рентгеновской области спектра

Е.Н. Рагозин, И.И. Собельман

Сообщается об эксперименте в исследовательском центре DESY в Гамбурге, где запущен лазер на свободных электронах в мягкой рентгеновской области спектра (6–30 нм). Обсуждаются также другие новые источники когерентного лазерного излучения в мягкой рентгеновской области спектра.

PACS numbers: 41.60.Cr, 42.55.-f, 42.55.Vc

В сентябрьском номере журнала *Physics World* опубликовано краткое сообщение [1] о том, что в исследовательском центре DESY в Гамбурге осуществлен запуск первого лазера на свободных электронах (ЛСЭ) в далекой ультрафиолетовой и мягкой рентгеновской областях спектра. Лазер, получивший название VUV-FEL (vacuum-ultraviolet free-electron laser), покрывает спектральный диапазон 6–30 нм и генерирует импульсы длительностью 10–50 фс. Тем самым он является первым в мире действующим лазером, в котором объединяются такие важнейшие характеристики, как коротковолновое излучение (6–30 нм) и импульс генерации с малой длительностью, что обеспечивает исключительно высокую для этого спектрального интервала интенсивность излучения. Дается качественная оценка интенсивности — пиковая яркость в несколько десятков миллионов раз превышает яркость большинства других источников синхротронного излучения.

Затраты на создание лазера VUV-FEL (линейный ускоритель, ондулятор длиной 260 м и т.п.) составили 117 миллионов евро.

Планируется, что с помощью лазера VUV-FEL примерно 200 ученых из 11 стран в ближайшее время начнут эксперименты в областях физики кластеров, физики твердого тела, исследования поверхности, физики плазмы, молекулярной биологии и др.

В лазере VUV-FEL осуществлен режим SASE (self-amplified spontaneous emission). Качественно суть режима SASE поясняется в [2]: "Излучение электронов в ондуляторе распространяется вперед со скоростью света, тогда как сами электроны, хотя и релятивистские, движутся немного медленнее. Таким образом, электроны отстают от своего излучения, которое начинает взаимодействовать с электронами, вошедшими в ондулятор чуть

раньше. Это взаимодействие может или ускорять, или тормозить электроны в зависимости от координаты электрона и фазы световой волны. Результирующий эффект состоит в том, что световая волна формирует так называемые микробанчи (microbunches). Несколько электронов начинают излучать коллективно, интенсивность излучения растет. Оно начинает сортировать электроны и уплотнять их во все более плотные микробанчи, заставляя излучать в фазе; мощность излучения растет экспоненциально вдоль длины ондулятора, вплоть до насыщения". Обсуждение режима SASE содержится также в [3]. Идеология режима SASE была апробирована в результате проведения в DESY эксперимента на установке TTF (TESLA Test Facility) в феврале 2000 г., в котором был продемонстрирован ЛСЭ в однопроходном режиме и получено при длительности импульсов излучения около 50 фс усиление вплоть до насыщения в области 80–120 нм. Мощность в максимуме составила ~ 1 ГВт ($\sim 2 \times 10^{13}$ фотонов в импульсе) [3].

Успешно опробовав лазер VUV-FEL, центр DESY совершил очень важный шаг вперед от лазера TTF на пути создания высокоэффективных источников когерентного коротковолнового излучения. Демонстрация режима SASE в спектральной области 6–30 нм имеет принципиальное значение для продвижения в область еще более коротких волн. Дело в том, что при уменьшении длины волны возникают трудности в использовании привычной схемы ЛСЭ с ондулятором внутри резонатора, как это имеет место, например, в видимом и инфракрасном диапазонах. По мере уменьшения длины волны проблема создания эффективного резонатора становится трудноразрешимой или вообще неразрешимой. Суть режима SASE состоит в том, что роль резонатора должна играть решетка плотности электронного пучка, которая самоподстраивается и фазируется за счет обратного воздействия фотонов, излучаемых в ондуляторе, на электроны пучка. Таким образом, становится возможным однопроходный режим усиления с насыщением без использования внешнего резонатора.

Отметим, что спецификой режима однопроходного усиления SASE является элемент случайности в начальных условиях процесса формирования лазерного импульса, связанный со случайными вариациями парамет-

Е.Н. Рагозин, И.И. Собельман. Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН, 119991 Москва, Ленинский просп. 53, Российская Федерация
Тел. (495) 132-63-29, (495) 135-20-28
E-mail: ENRagozin@sci.lebedev.ru

Статья поступила 10 октября 2005 г.

ров электронного пучка. В результате интенсивность и спектр лазерного импульса на выходе ЛСЭ также оказываются подверженными хаотическим вариациям в каждой из реализаций эксперимента. Преодоление флуктуационного характера излучения возможно при инжекции в ЛСЭ-усилитель достаточно интенсивного частотно-стабилизированного затравочного излучения. Именно это предусматривает второй этап развития лазера [4]. Планируется создание в лазере системы из двух ондуляторов, разделенных узкополосным монохроматором. В первом ондуляторе, работающем в режиме SASE, должен генерироваться первоначальный импульс. Затем импульс излучения проходит дифракционный монохроматор высокого разрешения, который играет роль узкополосного фильтра, для создания когерентной затравки, усиливаемой до насыщения во втором ондуляторном каскаде. Электронный пучок проходит, минуя монохроматор, по обводному магнитному каналу, в котором устраняется частичное структурирование сгустка по плотности, возникающее в первом ондуляторе. Использование стабилизированной затравки должно увеличить спектральную яркость на выходе примерно в 100 раз. Предполагается, что выходная мощность "ЛСЭ с затравкой" будет сосредоточена в одной спектральной линии, ширина которой по оценкам должна быть в сто раз уже, чем для "обычного" ЛСЭ в режиме SASE без затравки. Кроме короткой длины волны и перестраиваемости новый вариант ЛСЭ будет обладать пространственно-временной когерентностью, подобно классическим лазерам "оптического" диапазона.

Центр DESY планирует использовать лазер VUV-FEL помимо научной программы также в качестве макетного стенда для отработки проекта следующего лазера XFEL (X-ray free-electron laser), создание которого предполагается завершить в 2013 г. Этот лазер с общей длиной 3,4 км (сверхпроводящий ускоритель на 20 ГэВ в туннеле длиной 2 км) должен давать когерентное излучение в еще более коротковолновой области, 0,1–6 нм, нежели VUV-FEL, и иметь, кроме того, лучшее временное разрешение [2, 3].

Планируется, что два лазера VUV-FEL и XFEL в течение определенного периода времени будут работать совместно в целях проведения различного типа экспериментов [1].

Создание и введение в строй лазера XFEL, как полагают его разработчики, значительно расширит число применений коротковолновых когерентных источников излучения в физике, химии и биологии. В частности, лазер XFEL должен позволить изучать развитие во времени формирования химической связи; определять структуру протеинов без предварительной кристаллизации, которая требуется в экспериментах с использованием существующих источников синхротронного излучения.

По оценкам разработчиков стоимость создания лазера XFEL должна составить примерно 900 млн евро [1].

Центр DESY не является единственным исследовательским центром, ведущим работы по продвижению ЛСЭ в далекую ультрафиолетовую и рентгеновскую области спектра. Стэнфордский центр линейных ускорителей планирует создание к 2009 г. ЛСЭ для области спектра 0,15–6 нм, LCLS (Linac Coherent Light Source), стоимость которого оценивается в 380 млн долларов [1–3, 5]. В Брукхейвенской национальной лаборатории

ведутся очень перспективные работы по модификации режима SASE для коротковолновых ЛСЭ на установке NSLS (National Synchrotron Light Source) [3, 6]. В подходе этой лаборатории используется затравочное лазерное излучение от пикосекундного лазера. В первом ондуляторе (модуляторе), настроенном на частоту лазера, затравочное лазерное излучение вносит в электронный пучок небольшую модуляцию по энергии, которая затем преобразуется в продольную модуляцию по плотности в последовательно установленном магните дисперсии. Микроструктурированный по плотности электронный сгусток затем проходит второй ондулятор, настроенный на частоту высшей гармоники. В результате на выходе генерируются импульсы гармоники длительностью 1 пс.

Впечатляющий успех коротковолновых ЛСЭ потребовал полувекового развития ускорительной и ондуляторной техники, начиная со времени первых публикаций по ондуляторному излучению [7, 8].

Наряду с совершенствованием ЛСЭ, ведутся исследования по созданию других источников лазерного излучения в мягком рентгеновском и вакуумном ультрафиолетовом (ВУФ) диапазонах спектра. К ним относятся лазеры на переходах многозарядных ионов изоэлектронных последовательностей Ne, Ni и др. в плазме, источником накачки которых служит мощный твердотельный или иодный фотодиссоционный лазер, а также быстрый электрический разряд в капилляре (см., например, [9]). По-видимому, одним из наиболее ярких источников такого типа остается лазер на переходе Ne-подобного Y ($\lambda = 15,5$ нм, энергия импульса ~ 5 мДж, длительность импульса ~ 80 пс, расходимость ~ 10 мрад), созданный в Лоуренсовской национальной лаборатории в Ливерморе (США) [10]. Х. Рокке с сотрудниками (Колорадский университет, США) [11] удалось создать относительно небольшую лазерную систему на основе быстрого электрического разряда в капилляре в атмосфере Ar. Использовался переход $3p^1S_0 \rightarrow 3s^1P_1$ Ne-подобного Ar ($\lambda = 46,9$ нм); при частоте 4 Гц повторения импульсов длительностью 1,5 нс со средней энергией 0,88 Дж средняя мощность излучения лазера достигает 3,5 мВт. Недавно [12] удалось создать компактный вариант такого лазера, уместящийся на столе размером $0,4 \times 0,4$ м (или $0,4 \times 0,8$ м, включая вакуумный насос); средняя энергия импульса составляет 13 мкДж при частоте повторения импульсов 12 Гц. При использовании импульсно-периодического лазерного возбуждения (~ 1 Дж, 8 пс, 5 Гц) с предимпульсом на твердотельных мишенях продемонстрировано лазерное действие в режиме насыщения усиления на переходе $3p^1S_0 \rightarrow 3s^1P_1$ Ne-подобных ионов Ti (32,6 нм), V (30,4 нм) и Cr (28,6 нм), а также на переходе $4d^1S_0 \rightarrow 4p^1P_1$ Ni-подобных ионов Mo (18,9 нм), Ru (16,5 нм), Pd (14,7 нм), Ag (13,9 нм) и Cd (13,2 нм). Средняя энергия импульса составила 300 нДж для V и 530 нДж для Ti при средней мощности излучения соответственно 1,5 и 2,6 мкВт [13].

Еще одним источником когерентного излучения в ВУФ-области спектра может служить генерация высоких гармоник излучения фемтосекундного твердотельного лазера в струйке газа или в газонаполненном капилляре. Хотя значения энергии импульсов в диапазоне 10–20 нм измеряются наноджоулями (при частоте повторения ~ 1 кГц), на этом пути удается продвинуться в субфемтосекундный (аттосекундный) диапазон длительности [14, 15].

Сильные стороны альтернативных по отношению к ЛСЭ подходов — компактность, относительная дешевизна и простота, а также освоение аттосекундного диапазона длительностей — открывают для них свои области применения.

Сравнивая изложенные выше подходы к генерации когерентного излучения в далекой ВУФ и мягкой рентгеновской областях спектра, следует отметить, что ЛСЭ по совокупности параметров и широким возможностям применения являются безусловными лидерами. Их сильные стороны — это, прежде всего, высокая средняя мощность, перестраиваемость по длине волны, а также принципиальная возможность достижения рубежа $\sim 0,1$ нм.

Список литературы

1. Jeandron M *Phys. World* **18** (9) 8 (2005)
2. Plönjes E, Feldhaus J, Möller T *Phys. World* **16** (7) 33 (2003)
3. Рагозин Е Н, Собельман И И *УФН* **174** 207 (2004)
4. <http://www-hasyllab.desy.de/facility/fel/vuv/projects/seeding.htm>; Feldhaus J et al. *Opt. Commun.* **140** 341 (1997)
5. Gwynne P *Phys. World* **18** (7) 10 (2005)
6. Yu L H et al. *Phys. Rev. Lett.* **91** 074801 (2003)
7. Гинзбург В Л *Изв. АН СССР, сер. физ.* **11** 165 (1947)
8. Motz H J. *Appl. Phys.* **22** 527 (1951)
9. Svanberg S, Wahlström C-G (Eds) *X-Ray Lasers 1996: Proc. of the 5th Intern. Conf., Lund, Sweden, 10–14 June 1996* (Institute of Physics Conf. Ser. No. 151) (Bristol: Institute of Physics Publ., 1996)
10. Da Silva L B et al., in *X-Ray Lasers 1996: Proc. of the 5th Intern. Conf., Lund, Sweden, 10–14 June 1996* (Institute of Physics Conf. Ser. No. 151, Eds S Svanberg, C-G Wahlström) (Bristol: Institute of Physics Publ., 1996) p. 496
11. Macchietto C D, Benware B R, Rocca J J *Optics Lett.* **24** 1115 (1999)
12. Heinbuch S et al. *Opt. Express* **13** 4050 (2005); <http://www.opticsexpress.org/abstract.cfm?URI=OPEX-13-11-4050>
13. Alessi D et al. *Opt. Express* **13** 2093 (2005)
14. Day C *Phys. Today* **57** (10) 21 (2004)
15. Paul P M et al. *Science* **292** 1689 (2001); <http://www-drecam.cea.fr/spam/athemes/atto/atto-pulses.htm>

Laser sources in the soft X-ray spectral region

E.N. Ragozin, **I.I. Sobel'man**

*P.N. Lebedev Physics Institute, Russian Academy of Sciences,
Leninskii prosp. 53, 119991 Moscow Russian Federation
Tel. (7-495) 132-63 29, (7-495) 135-20 28
E-mail: ENRagozin@sci.lebedev.ru*

The launch of the soft X-ray (6–30 nm) free-electron laser at the DESY research center in Hamburg is reported, and other new coherent soft-X-ray laser sources are discussed.

PACS numbers: 41.60.Cr, **42.55.–f**, 42.55.Vc

Bibliography — 15 references

Uspekhi Fizicheskikh Nauk **175** (12) 1339–1341 (2005)

Received 10 October 2005

Physics–Uspekhi **48** (12) (2005)