

Продвижение лазеров на свободных электронах в рентгеновскую область спектра

Е.Н. Рагозин, И.И. Собельман

PACS numbers: 41.60.Cr, 41.75.Jv, 42.55.-f

Еще в 1947 г. В.Л. Гинзбург [1] рассмотрел спонтанное излучение электронов, а также "сгустков" электронов, движущихся с релятивистской скоростью и совершающих осцилляторное движение в плоскости, перпендикулярной направлению этой скорости — излучение, получившее название ондуляторного. Было показано, что ондуляторное излучение обладает двумя существенными преимуществами перед синхротронным излучением: монохроматичностью в заданном направлении и большей спектральной плотностью потока¹. Несколько позднее, в 1951 г., ту же проблему рассмотрел Г. Мотц [2].

Источники ондуляторного излучения и созданные на их базе лазеры на свободных электронах (ЛСЭ) сыграли исключительно важную роль во многих приложениях современной физики. Фундаментальное отличие ЛСЭ от обычных лазеров состоит в том, что их частота не "привязана" к переходам между дискретными уровнями энергии в атомах, молекулах и ионах или к межзонным переходам в кристаллах. Рабочей средой коротковолнового ЛСЭ служит пучок релятивистских электронов, движущихся в сильном периодическом магнитном поле, а длина волны ЛСЭ допускает непрерывную перестройку путем изменения энергии электронов пучка. Успехи ускорительной техники позволили продвинуться из первоначально освоенной ЛСЭ области длинноволнового излучения в область более коротких волн, сначала инфракрасного и видимого диапазонов, а затем в область ультрафиолета. На повестке дня стоит создание ЛСЭ в области вакуумного ультрафиолета (ВУФ) и мягкого рентгена (см., например, [3–6]). Весьма амбициозные планы продвижения в коротковолновую область спектра имеют научные центры DESY (Deutsches Elektronen Synchrotron) в Гамбурге и SLAC (Stanford Linear Acceleration Center) в Калифорнии: ставится цель генерации когерентного рентгеновского излучения вплоть до длин волн $\lambda \sim 0,1 - 1$ нм в форме фемтосекундных импульсов. В

самое последнее время были опубликованы обзорная статья Е. Плюнжеса, Й. Фельдхауса и Т. Мюллера [7] и статья [8] группы сотрудников Брукхейвенской национальной лаборатории, в которой излагаются результаты экспериментов по первому ЛСЭ в режиме генерации гармоник в УФ диапазоне спектра. Обе статьи посвящены продвижению техники ЛСЭ в рентгеновскую область.

В настоящей заметке дается краткий обзор содержания работ [7, 8]. В [7] наибольшее внимание уделяется однопроходному режиму самоусиления спонтанного излучения SASE (Self Amplified Spontaneous Emission) и первым экспериментам по его реализации в ВУФ области в центре DESY. Дело в том, что продвижение в область мягкого рентгена возможно, в принципе, при сохранении классической схемы ЛСЭ, т.е. с ондулятором, помещенным в резонатор. До длин волн $\lambda \sim 10$ нм в резонаторе могут применяться зеркала с многослойными покрытиями. Для длин волн порядка единиц нанометров, и тем более для $\lambda \sim 0,1$ нм, достаточно эффективных зеркал, необходимых для создания резонаторов, не существует. Необходимо однопроходное усиление и формирование когерентного пучка в режиме SASE.

В [7] дается качественное пояснение сути метода SASE: "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 ранее. 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 собирает электроны в так называемые микробанчи (microbunches), которые разделены расстоянием, определяемым периодом магнитной решетки ондулятора. Несколько электронов начинают излучать коллективно; интенсивность излучения увеличивается. Оно начинает сортировать электроны и уплотнять их во все более плотные микробанчи, заставляя излучать в фазе; мощность излучения растет экспоненциально вдоль длины ондулятора, пока не насыщается".

Другими словами, режим SASE состоит в том, что роль резонатора должна играть решетка плотности электронного пучка, которая самоподстраивается и фазирована за счет обратного воздействия на электроны пучка со стороны излучаемых в ондуляторе фотонов. В результате обмена энергией с генерируемой электронами электромагнитной волной в электронном пучке возникает

¹ Термин *синхротронное излучение* часто используют расширительно, включая в него ондуляторное излучение как один из вариантов излучения электронов в магнитном поле.

Е.Н. Рагозин, И.И. Собельман. Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН,
119991 Москва, Ленинский просп. 53, Российская Федерация
Тел. (095) 132-57-49, 135-20-28. Факс (095) 135-24-08
E-mail: ragozin@sci.lebedev.ru, mira@sci.lebedev.ru

Статья поступила 2 октября 2003 г.

продольная модуляция плотности, усиливающаяся по мере прохождения ондулятора. На выходе ондулятора электроны оказываются сгруппированными в микробанчи в форме тонких дисков, отстоящих друг от друга на длину волны генерируемого света, вследствие чего электроны излучают в значительной мере синфазно. В результате происходит экспоненциальный рост мощности излучения с длиной пути, пройденного в ондуляторе, — в принципе, до насыщения. Число микробанчей, на которые разбивается первоначальный импульс электронов, может составлять несколько тысяч.

Согласно [7] эксперимент по апробации идеологии режима SASE был выполнен в DESY. На установке ТТФ (TESLA Test Facility) в DESY продемонстрирована действенность механизма SASE и впервые реализован ЛСЭ в ВУФ области спектра в однопроходном режиме, без резонатора (февраль 2000 г.). Постоянное совершенствование установки позволило получить усиление вплоть до насыщения в диапазоне 80–120 нм при длительности импульсов излучения около 50 фс. Мощность в максимуме составила ~ 1 ГВт, что соответствует $\sim 2 \times 10^{13}$ фотонов в импульсе. Традиционный опыт Юнга с двумя щелями продемонстрировал высокую степень "поперечной" когерентности лазерного пучка. Наблюдался контраст между максимумами и минимумами интерференционной картины в 70 %.

Реализация ЛСЭ в рентгеновском диапазоне предъявляет исключительные высокие требования к ускорительной технике. Так, для рентгеновского ЛСЭ в DESY согласно [7] требуются электронные пучки в виде импульсов длительностью около 200 фс с максимальным током 5000 А. Длительность импульсов рентгеновского излучения составит при этом ~ 100 фс. Предполагается организовать электронные пучки в виде последовательности из порядка 4000 импульсов, следующих с частотой повторения 10 Гц.

В настоящее время проводится работа по совершенствованию ЛСЭ, первый этап которой завершится в конце 2004 г. Предполагается увеличить длину ЛСЭ со 100 до 250 м, при этом ожидается, что коротковолновая граница излучения составит 6 нм. На втором этапе намечено сооружение сверхпроводящего ускорителя на 20 ГэВ в туннеле длиной 2 км. Для завершения строительства потребуются восемь лет. По завершении второго этапа область перестройки длины волны ЛСЭ должна составить $\lambda \sim 6-0,1$ нм.

Создаваемый в Стэнфорде ЛСЭ LCLS (Linac Coherent Light Source) вступит в строй в 2008 г. Он предназначен для генерации излучения в диапазоне 1,5–0,15 нм.

Спецификой режима однопроходного усиления SASE является элемент случайности в начальных условиях процесса формирования лазерного импульса, связанный со случайными вариациями параметров электронного пучка. В результате интенсивность и спектр лазерного импульса на выходе ЛСЭ также подвержены хаотическим вариациям для каждой из реализаций эксперимента. По этой причине представляет интерес модификация режима SASE, осуществленная в экспериментах Брукхейвенской национальной лаборатории на установке NSLS (National Synchrotron Light Source) [8].

В эксперименте используется метод генерации гармоник затравочного лазерного излучения HGHG (High-Gain Harmonic Generation). Суть метода состоит в следующем. В результате взаимодействия электронного пучка с затравочным лазерным излучением в первом ондуля-

торе, настроенном на частоту лазерного излучения ω , осуществляется, в сочетании с последовательно установленным магнитом дисперсии, модуляция электронной плотности. Во втором (основном) ондуляторе, настроенном на частоту гармоники затравочного лазерного импульса $n\omega$, микроструктурированный пучок электронов осуществляет генерацию когерентного излучения с частотой $n\omega$ и его дальнейшее усиление вплоть до насыщения.

В эксперименте на NSLS [8] продемонстрирована генерация импульсов 3-й гармоники ($\lambda = 266$ нм) излучения затравочного лазера на кристаллах Ti:сапфир ($\lambda = 800$ нм, длительность импульсов 9 пс). Длина первого ондулятора равна 0,8 м, длина второго (основного) ондулятора — 10 м. При мощности затравочного лазерного импульса 30 МВт в условиях насыщения получены импульсы 3-й гармоники с энергией ~ 100 мкДж и длительностью 1 пс. Параметры ЛСЭ более стабильны, чем в режиме SASE; они менее зависимы от вариаций характеристик электронного пучка. Последнее продемонстрировано экспериментами при различной интенсивности затравочного лазерного излучения, вплоть до его отключения. Эти эксперименты также показывают, что метод генерации гармоник HGHG, осуществленный в [8], позволяет значительно уменьшить длину ондулятора по сравнению с режимом SASE. Следует, однако, отметить, что остается неясным, как далеко в область рентгена удастся распространить метод генерации гармоник HGHG. Это определяется возможностью создания необходимого "затравочного" лазера. Кроме того, использование "затравочного" лазера в определенной степени вступает в противоречие с основной принципиальной особенностью ЛСЭ — независимостью генерации ЛСЭ от частот каких-либо реперов: атомных переходов, резонаторов и т.п.

Это противоречие снимается, если в качестве затравочного излучения также использовать излучение ЛСЭ, как это рассматривается в [9]. В принципе, возможен каскад из нескольких ЛСЭ; ондулятор каждого последующего ЛСЭ настраивается на определенную гармонику предыдущего ЛСЭ. Пример такого типа дается в [9], где рассмотрен каскад $0,8 \rightarrow 0,4 \rightarrow 0,2 \rightarrow 0,1$ нм. Не исключено, что подобный путь продвижения ЛСЭ в рентгеновскую область окажется одним из самых перспективных. Основание для такой оценки дают успешные эксперименты по генерации 3-й гармоники (3ω) излучения затравочного лазера, проведенные в Брукхейвенской национальной лаборатории на NSLS [8].

Круг предполагаемых применений для коротковолновых ЛСЭ необычайно широк. Он включает в себя эксперименты по фемтосекундной фотохимии, исследованию структуры сложных биомолекул, физике кластеров, физике сверхплотной плазмы и другие, проведение многих из которых ранее было невозможно. Этот вопрос подробно обсуждается в [7].

Список литературы

1. Гинзбург В Л *Изв. АН СССР. Сер. физ.* **11** 165 (1947)
2. Motz H J *Appl. Phys.* **22** 527 (1951)
3. Этгвуд Д, Холбак К, Кванг-Дже Ким *УФН* **159** 125 (1989)
4. Бессонов Е Г, Виноградов А В *УФН* **159** 143 (1989)
5. Мухин К Н, Суставов А Ф, Тихонов В Н *УФН* **173** 511 (2003)
6. Colson W B et al. *Phys. Today* **55** (1) 35 (2002)
7. Plönjes E, Feldhaus J, Möller T *Phys. World* **16** (7) 33 (2003)
8. Yu L H et al. *Phys. Rev. Lett.* **91** 074801 (2003)
9. Saldin E L, Schneidmiller E A, Yurkov M V *Opt. Commun.* **212** 377 (2002)