

## О первых рентгеновских лазерах\*

Дж.Нильсен

*Приведены воспоминания о начале работ по рентгеновским лазерам сотрудника Лоуренсовской Ливерморской национальной лаборатории, в которой в начале 80-х годов был продемонстрирован первый рентгеновский лазер с ядерной накачкой.*

**Ключевые слова:** рентгеновский лазер, лазерная плазма, ионы высокой кратности.

С тех пор как пионерские исследования Н.Г.Басова привели к изобретению лазера, ученые всего мира постоянно работают над уменьшением длины волны лазеров и получением генерации в рентгеновском диапазоне. Некоторые из основополагающих идей были выдвинуты в Физическом институте им. П.Н.Лебедева, ученые которого продолжают активно участвовать в этих работах.

В середине 70-х годов появилось много статей, посвященных рентгеновским лазерам. Одна из них, написанная Чаплином и Вудом из Лоуренсовской Ливерморской национальной лаборатории (ЛЛНЛ), была опубликована в журнале «Physics Today» [1]. Авторы статьи, рассмотрев многие из тогдашних идей по рентгеновским лазерам, предположили, что они могут оказать большое влияние на развитие биологии, химии и кристаллографии. Они предположили также, что рентгеновские лазеры смогут когда-нибудь использоваться для изучения структуры молекул.

Во многих лабораториях уже проводились эксперименты с лазерной плазмой в надежде получить генерацию в рентгеновском диапазоне. В [1] в качестве наиболее перспективной обсуждалась генерация на длине волны 5 Å перехода  $n = 3 \rightarrow n = 2$  в водородоподобном Кг. Эта схема аналогична той, на которой впоследствии был реализован лазер с длиной волны 182 Å в ионе C VI [2]. Авторы [1] предложили использовать набор пикосекундных лазеров для получения режима бегущей волны накачки при облучении цилиндрической мишени. Они понимали, что достичь этой цели с помощью имеющихся лазеров невозможно. На обложке «Physics Today» была изображена камера мишени установки JANUS. Подпись гласила, что эксперименты по рентгеновским лазерам планируются вести на мощных лазерах, предназначенных для исследований по ЛТС. По иронии судьбы более чем через 20 лет пучок излучения JANUS был использован в качестве предимпульса в первых экспериментах по получению генерации в рентгеновском диапазоне при последовательном облучении мишени двумя импульсами длительностью  $\sim 1$  нс и  $\sim 1$  пс.

Активные работы по поиску инверсии в рентгеновском диапазоне начались еще в начале 70-х гг. Хотя признаки усиления наблюдались несколькими группами исследователей, наиболее обещающей выглядела публикация Илюхина и др. из Физического института им. П.Н.Лебедева [3]. Авторы [3] сообщили о регистрации сигнала в области 600 Å, что было обусловлено, как они полагали, усилением на  $3p - 3s$ -переходе в неоподобном Са. После этого появилось множество работ, посвященных достижению генерации на неоподобных ионах, но только через семь лет в ЛЛНЛ был продемонстрирован первый лабораторный рентгеновский лазер на этих переходах в неоподобном Se [4]. Следует отметить, что сегодня с появлением метода накачки с использованием предимпульса [5] линия  $3p \ ^1S_0 - 3s \ ^1P_1$  является доминирующей в неоподобных схемах, как это и было предсказано Виноградовым и др. (ФИАН) еще в 1977 г. [6].

В начале 80-х годов исследования по рентгеновским лазерам обратили на себя внимание прессы. Это было связано с новым применением, которое могло стать главной движущей силой данных исследований в США. В 1981 г. в журнале «Aviation week» Кларенс Робинсон написала о том, что ученые из ЛЛНЛ совершили прорыв в лазерной технологии, продемонстрировав компактное лазерное устройство, накачиваемое рентгеновским излучением ядерного взрыва небольшой мощности.

В начале 80-х годов программа ЛЛНЛ по рентгеновским лазерам вызвала большой энтузиазм. Она развивалась в связи с задачей создания системы противоракетной обороны, выдвинутой президентом Рейганом. Впоследствии она стала известна как «Звездные войны», или СОИ. Осуществленной частью этой программы [8, 9] стала успешная демонстрация в начале 80-х годов первого рентгеновского лазера, накачиваемого ядерным взрывом. Позже в лабораторных условиях с помощью лазерной установки Novetta был успешно продемонстрирован лазер на неоподобном селене [4].

Из статьи Аврорина и др. (Челябинск-70) [10] следовало, что в СССР также проявлялся большой интерес к рентгеновскому лазеру. В статье было описано, как в Советском Союзе начинались работы по физике рентгеновских лазеров и изучению возможностей создания рентгеновского лазера с параметрами, аналогичными приведенным в журнале «Aviation week». Сообщалось

\*Перевел с англ. В.Е. Левашов.

J.Nilsen. Lawrence Livermore National Laboratory, Livermore, CA 94551-9900

Поступила в редакцию 14 октября 2002 г.

также, что в 1987 г. в экспериментах с ядерной накачкой была успешно получена генерация рентгеновского лазера с энергией около 20 кДж на длине волны 39 Å и 100 кДж – на длине волны 28 Å.

Понятно, что соревнование между Соединенными Штатами и Советским Союзом было важным фактором развития рентгеновских лазеров.

С окончанием ядерных испытаний в 1992 г. программа по рентгеновским лазерам в ЛЛНЛ завершилась. В ходе этой работы было создано большое число вычислительных программ, материалов, диагностик и т. п. Научное и техническое наследие той стадии исследований по рентгеновским лазерам продолжает развиваться и сегодня.

В течение более десяти лет Министерство обороны США финансировало исследования по физике рентгеновских лазеров на двухпучковой установке NOVA. В работах по рентгеновским лазерам была значительно усовершенствована многослойная рентгеновская оптика, что позволило создать интерферометры на ее основе и разработать методы получения рентгеновских изображений. Кроме того, был разработан рентгеновский микроскоп с пространственным разрешением 10 мкм, в котором использовалась френелевская зонная пластинка на  $K_{\alpha}$ -линии меди с энергией кванта 8 кэВ.

Работы по рентгеновским лазерам потребовали нового уровня понимания физики многозарядных ионов и измерения их характеристик. Для этих целей в ЛЛНЛ была создана ловушка ионов с электронным пучком (ЕВИТ), которая позволяет исследовать свойства ионов практически любой кратности ионизации.

Разработка рентгеновских лазеров, требующая все более сложных атомных моделей и вычислительных программ по кинетике, стимулировала появление значительно улучшенной программы по атомной физике YODA и программы по кинетике XRASER. По программе XRASER можно вычислить коэффициент усиления с детальным учетом переноса излучения, включая пленение излучения и эффекты фотонакачки.

Серьезные успехи были достигнуты и в разработке новых материалов. Например, удалось создать сверхлег-

кие кремниевые аэрогели с плотностью до 1 мг/см<sup>3</sup> и получить органические аэрогели.

Более подробно о наследии программы по рентгеновским лазерам говорится в двух отчетах ЛЛНЛ [8, 9]. Подводя итоги, перечислим основные достижения программы: первый лабораторный рентгеновский лазер, сверхлегкие аэрогели, вычислительные программы по кинетике плазмы и атомной физике, значительно улучшенные диагностики плазмы, ловушка ионов с электронным пучком (ЕВИТ) для работ по атомной физике, новые цифровые методы маммографии, рентгеновский микроскоп высокого разрешения на основе зонной пластинки, многослойная рентгеновская оптика и получение лазерной генерации на самой малой длине волны (~40 Å).

Работа выполнена при содействии Министерства энергетики США в Лоуренсовской Ливерморской национальной лаборатории Калифорнийского университета по контракту W-7405-Eng-48.

1. Chapline G., Wood L. *X-ray lasers. Phys. Today*, № 6, 40 (1975).
2. Suckewer S., Skinner C.H., Milchberg H., Keane C., Voorhees D. *Phys. Rev. Lett.*, **55**, 1753 (1985).
3. Илюхин А.А., Перегудов Г.В., Рагозин Е.Н., Собельман И.И., Чирков В.А. *Письма в ЖЭТФ*, **25**, № 12, 569 (1977).
4. Matthews D.L., Hagelstein P.L., Rosen M.D., Eckart M.J., Ceglio N.M., Hazi A.U., Meddecki H., MacGowan B.J., Trebes J.E., Whitten B.L., Campbell E.M., Hatcher C.W., Hawryluk A.M., Kauffman R.L., Pleasance L.D., Rambach P., Scofield J.H., Stone G., Weaver T.A. *Phys. Rev. Lett.*, **54**, 110 (1985).
5. Nilsen J., MacGowan B.J., Da Silva L.B., Moreno J.C. *Phys. Rev. A*, **48**, 4682 (1993).
6. Виноградов А.В., Собельман И.И., Юков Е.А. *Квантовая электроника*, **4**, № 1, 63 (1977).
7. Robinson C.A., Jr. *Aviation Week & Space Technology*, pp. 25-27 (February, 23, 1981).
8. Nilsen J. *Legacy of the X-ray Laser Program. Lawrence Livermore National Laboratory report UCRL-LR-114552* (August, 6, 1993); <http://www.llnl.gov/tid/lof/documents/pdf/222506.pdf>.
9. Nilsen J. *Energy & Technology Review*, p. 13-21 (November, 1994); <http://www.llnl.gov/etr/11.94.html> или [http://www.llnl.gov/etr/pdfs/11\\_94.2.pdf](http://www.llnl.gov/etr/pdfs/11_94.2.pdf).
10. Avrorin E.N., Lykov V.A., Loboda P.A., Politov V.Yu. *Laser and Particle Beams*, **15**, 3 (1997).