

механизме и кинетике фазовых ударно-волновых превращений. Поэтому эксперименты с использованием ИРА должны не только демонстрировать явление (сейчас иллюстративный характер экспериментов нередко обусловлен их относительно невысокой точностью, обсуждение которой мы выносим за рамки данной статьи), но и служить пониманию физики явления. В частности, метод ИРА может быть полезен для исследования плавления в УВ, что продемонстрировано на примере висмута.

Автор благодарит Р.Ф. Трунина за обсуждение и научное редактирование статьи, а также за многолетнее внимание к методу ИРА в РФЯЦ – ВНИИЭФ.

Список литературы

1. Альтшулер Л В и др., в сб. *Девятое научно-техническое совещание по применению рентгеновских лучей к исследованию материалов, 18–24 декабря 1967 г., Ленинград, Тезисы докладов* (Л., 1967) с. 37
2. Егоров Л А и др. *ПТЭ* (2) 200 (1968)
3. Егоров Л А, Ниточкина Э В, Орекин Ю К *Письма в ЖЭТФ* **16** 8 (1972) [Egorov L A, Nitochkina E V, Orekin Yu K *Sov. Phys. JETP* **16** 4 (1972)]
4. Johnson Q et al. *Phys. Rev. Lett.* **25** 1099 (1970)
5. Johnson Q, Mitchell A C *Phys. Rev. Lett.* **29** 1369 (1972)
6. Johnson Q, Mitchell A C, Evans L *Appl. Phys. Lett.* **21** 29 (1972)
7. Jamet F, in *High Pressure Science and Technology, Proc. VII AIRAPT Conf., Le Creusot, 1978*, p. 974
8. Kondo K, Sawaoka A, Saito S, in *Proc. of the 4th Intern. Conf. on High Pressure, Kyoto, 1974*, p. 845
9. Kondo K, Sawaoka A, Saito S, in *High Velocity Deformation of Solids, Tokyo, 1978*, Vol. B, p. 176
10. Kondo K et al., in *High Pressure Science and Technology, New York, 1979*, Vol. 2, p. 883
11. Kondo K, Sawaoka A, Saito S, in *High Pressure Science and Technology, New York, 1979*, Vol. 2, p. 905
12. Muller F, Schulte E *Z. Naturforsch. A* **33** 918 (1978)
13. Zaretsky E, in *Shock Compression of Condensed Matter — 1997, Woodbury, 1998*, p. 883
14. Loveridge-Smith A et al. *Phys. Rev. Lett.* **86** 2349 (2001)
15. Rigg P A, Gupta Y M *Phys. Rev. B* **63** 094112 (2001)
16. Wark J S et al. *Phys. Rev. B* **35** 9391 (1987)
17. Wark J S et al. *J. Appl. Phys.* **68** 4531 (1990)
18. Альтшулер Л В и др. *ЖЭТФ* **81** 672 (1981) [Altshuler L V et al. *Sov. Phys. JETP* **54** 359 (1981)]
19. Подурец А М и др. *Изв. АН СССР. Физика Земли* (6) 26 (1989)
20. Уманский Я С *Рентгенография металлов и полупроводников* (М.: Металлургия, 1969) с. 209
21. Баренбойм А И и др. *ПТЭ* (1) 189 (1992)
22. Егоров Л А и др. *ЖЭТФ* **103** 135 (1993) [Egorov L A et al. *JETP* **76** 73 (1993)]
23. Зарецкий Е Б и др. *ТВТ* **29** 1002 (1991)
24. Johnson Q, Mitchell A C, in *High Pressure Science and Technology, Proc. VII AIRAPT Conf., Le Creusot, 1978*, p. 977
25. Zaretsky E *J. Phys. IV France* **7** (C3) 329 (1997)
26. Woolsey N C et al., in *Shock Compression of Condensed Matter — 1995, Woodbury Pt. 2* (New York: AIP Press, 1996) p. 997
27. Подурец А М, Дорохин В В, Трунин Р Ф *ТВТ* **41** 254 (2003) [Podurets A M, Dorokhin V V, Trunin R F *High Temp.* **41** 216 (2003)]
28. Подурец А М и др. *Изв. АН СССР. Физика Земли* (1) 107 (1991)
29. Егоров Л А и др. *Хим. физика* **14** (2–3) 100 (1995)
30. Баренбойм А И, Дорохин В В, Егоров Л А, в сб. *1 Всесоюзный симп. по макроскопической кинетике и химической газодинамике, Алма-Ата. Тезисы докладов Т. 2, Ч. 2* (Черноголовка, 1984) с. 51
31. d'Almeida T, Gupta Y M *Phys. Rev. Lett.* **85** 330 (2000)
32. Трунин Р Ф (Ред.) *Экспериментальные данные по ударно-волновому сжатию и адиабатическому расширению конденсированных веществ* (Саров: РФЯЦ – ВНИИЭФ, 2006)
33. Podurets A M, Mokhova V V, in *8 Intern. Conf. on High Pressure Semiconductor Physics, August 9–13, 1998, Thessaloniki*

34. Kishimura H et al. *Phys. Rev. B* **74** 224301 (2006)
35. Meyers M A et al. *Acta Mater.* **51** 1211 (2003)
36. Kalantar D H et al. *Phys. Rev. Lett.* **95** 075502 (2005)
37. Зарецкий Е Б и др. *ДАН СССР* **316** 111 (1991) [Zaretskii E B et al. *Sov. Phys. Dokl.* **36** 76 (1991)]
38. Тонков Е Ю *Фазовые диаграммы соединений при высоком давлении* (М.: Наука, 1983)
39. Graham R A *J. Appl. Phys.* **39** 437 (1968)
40. Hawreliak J et al. *Phys. Rev. B* **74** 184107 (2006)
41. Подурец А М и др., в сб. *IV Всесоюз. конф. по детонации, Телаву, 1988*, Т. 1, с. 162
42. Podurets A M, Barenboim A I, Trunin R F, in *Intern. Conf. on Condensed Matter Under High Pressures, Bombay, 1996, Proc.: Advances in High Pressure Research in Condensed Matter* (Eds S K Sikka, S C Gupta, B K Godwal) (New Delhi, 1997) p. 285
43. McQueen R G et al., in *High-Velocity Impact Phenomena* (Ed. R Kinslow) (New York: Academic Press, 1970) p. 293 [Маккуин Р и др., в сб. *Высокоскоростные ударные явления* (М.: Мир, 1973) с. 299]
44. Kutsar A R, Lyasotski I V, Podurets A M, Sanches-Bolinches A F *High Pressure Research* **4** 475 (1990)
45. Schaufelberger Ph, Merx H, Contre M *High Temp. High Pressures* **4** 111 (1972)
46. Трунин Р Ф и др. *ТВТ* **33** 222 (1995)

PACS numbers: **42.55. – f**, **42.62. – b**, **52.57. – z**
DOI: 10.3367/UFNr.0181.201104m.0434

Мощные лазеры и их применение в исследованиях физики высоких плотностей энергии

С.Г. Гаранин

1. Введение

Во Всероссийском научно-исследовательском институте экспериментальной физики (ВНИИЭФ) работы по созданию мощных лазеров были развернуты в 1963 г. по инициативе научного руководителя Ю.Б. Харитона. Возглавили эти работы С.Б. Кормер и Г.А. Кириллов. Активные экспериментальные исследования по данному направлению начались в середине 60-х годов прошлого века. В 1965 г. к Ю.Б. Харитону обратился Н.Г. Басов с предложением провести совместные исследования возможности создания лазеров с максимально достижимой энергией излучения.

Предложение явилось следствием того факта, что взрыв ядерного заряда сопровождается очень мощным световым излучением, которое, как предполагалось, можно было бы использовать для световой накачки лазеров. Однако температура свечения ударной волны в воздухе при действии ядерного взрыва принципиально отличается от температуры свечения ударной волны в благородных газах, возбуждаемой обычным взрывчатым веществом (ВВ). Этот более простой и реальный способ накачки был выбран в качестве основного для совместных исследований специалистов Физического института им. П.Н. Лебедева Академии наук (ФИАН) и ВНИИЭФ.

С.Г. Гаранин. ФГУП "Российский федеральный ядерный центр — Всероссийский научно-исследовательский институт экспериментальной физики", г. Саров, Нижегородская обл., РФ
E-mail: garanin@vniief.ru

В декабре 1965 г. был проведён первый взрывной эксперимент по получению лазерной генерации на озоне, а в декабре 1966 г. был получен лазерный эффект в случае, когда в качестве рабочей смеси использовался CF_3I . В 1970 г. завершился важный этап исследований взрывных фотодиссоционных лазеров (ВФДЛ) — в кооперации с ФИАНом и Государственным оптическим институтом (ГОИ) был создан лазер мегаджоульного уровня энергии с длительностью импульса около 100 мкс.

Успешное развитие работ дало толчок к созданию в Российском федеральном ядерном центре — ВНИИЭФ (РФЯЦ – ВНИИЭФ) лазерных установок, предназначенных для исследования физики высоких плотностей энергии, включая исследования по проблеме лазерного термоядерного синтеза (ЛТС). Возникает естественный вопрос: почему данное направление стало динамично развиваться в ядерном центре, основной тематикой которого является ядерное оружие?

При взрыве термоядерного заряда физические процессы происходят при высокой плотности энергии. И хотя в лабораторных условиях пока невозможно воспроизвести аналогичный уровень параметров, можно улучшить понимание физики процессов, совершенствуя расчётно-теоретические модели и тестируя их в лабораторных опытах. К достоинствам исследований с применением лазеров относятся возможность многократного проведения экспериментов и применения развивающейся прецизионной диагностики, что позволяет поэлементно изучать отдельные явления, протекающие в плазме с термоядерными температурами.

Первой опубликованной работой по использованию лазера для зажигания термоядерного топлива являлась работа Н.Г. Басова и О.Н. Крохина [1]. Несколько позднее была опубликована работа [2] американских учёных. Первые успешные эксперименты на сферических мишенях были выполнены на установке "Кальмар" (ФИАН) [3]. Эти исследования положили начало разработкам лазерных установок для изучения физики инерциального термоядерного синтеза.

В настоящее время рассматривают две основные схемы сжатия термоядерных мишеней: прямого и непрямого облучения. В обеих схемах на внешнюю поверхность сферической оболочки, заполненной термоядерным топливом (например, дейтерий-тритиевой (DT) смесью), падает поток энергии, вызывая испарение оболочки и создавая тем самым абляционное давление. Под его действием неиспарённый сферический поршень сжимает топливо до требуемой плотности ρ и нагревает его до необходимой температуры T .

В схеме прямого облучения испарение оболочки происходит при непосредственном воздействии лазерного излучения (ЛИ) на мишень. В непрямом способе сжатие термоядерного горючего осуществляется под действием рентгеновского излучения, возникающего в результате нагрева лазерным излучением специальной сферической или цилиндрической капсулы, окружающей термоядерную мишень.

Фактически в таких мишенях реализуется принцип инерциального удержания плазмы, заключающийся в том, что сжатое топливо существует в течение некоторого промежутка времени τ , необходимого для разгрузки сжатой плазмы. На протяжении этого времени и нужно создать условия для зажигания мишени, т.е.

условия, при которых термоядерное энерговыделение превышает энергию, вложенную в мишень. Учитывая, что $\tau \approx R/c_s$, где R — радиус сжатого ядра, c_s — скорость звука, можно получить условие зажигания $\rho R \geq 0,3 \text{ г см}^{-2}$ при $T \geq 10 \text{ кэВ}$.

В РФЯЦ – ВНИИЭФ работы по созданию моноимпульсных лазеров и исследования на них различных аспектов ЛТС были начаты в 1972 г. по инициативе Ю.Б. Харитона, С.Б. Кормера и Г.А. Кириллова. Для исследования основных проблем, связанных с решением задач ЛТС, во ВНИИЭФ был создан комплекс мощных лазерных установок: "Искра-4" [4], "Искра-5" [5], "Луч" [6], "Фемто" [7].

2. Мощные фотодиссоционные йодные лазеры

для исследований по лазерному термоядерному синтезу
Интерес к фотодиссоционному йодному лазеру (ФИЛ) как драйверу для ЛТС возник после публикации работы [8] в 1971 г. Возможности применения йодных лазеров для этих целей исследовались также в работах советских [9–11] и зарубежных [12–14] учёных.

В 1979 г. была создана мощная одноканальная йодная установка "Искра-4" с энергией излучения 2000 Дж и длительностью импульса 0,1–0,3 нс. Установка была оснащена системой деления, позволявшей разделить лазерный пучок на четыре части, с помощью которых термоядерные мишени облучались в симметрии тетраэдра. В середине 1980-х годов установка являлась самым мощным (10 ТВт) в мире одноканальным лазером.

Успешное решение задачи по созданию и запуску установки "Искра-4" позволило приступить к проектированию и строительству значительно большей крупной йодной фотодиссоционной установки "Искра-5", которая была запущена в конце 1989 г. и до сих пор находится в эксплуатации. Установка состоит из 12 лазерных каналов с общей энергией излучения до 30–40 кДж при длительности импульса $\approx 0,25$ нс. Для питания ламп накачки и электроразрядных источников был создан комплекс ёмкостных накопителей энергии с полной запасённой энергией ≈ 65 МДж [15].

Мишенная камера установки "Искра-5" снабжена 12-ю уникальными трёхкомпонентными зеркально-линзовыми объективами [16]. Основные эксперименты в 12-канальном режиме облучения проводились с выходной энергией 9–10 кДж при длительности импульса 0,3–0,4 нс. В настоящее время установка, переведённая на работу на второй гармонике [17], обеспечивает ввод в камеру взаимодействия энергии лазерного излучения 2,4–3 кДж при длительности импульса 0,5–0,6 нс.

3. Исследования на лазерной установке "Искра-4"

Основным направлением исследований на установке "Искра-4" было изучение сжатия мишеней прямого облучения в режиме взрывающейся оболочки (см., например, [18]). Данный режим характеризуется невысокой степенью объёмного сжатия ($\delta \approx 100$) и слабой чувствительностью к асимметрии схождения оболочки [19]. При этом выход нейтронов N достаточен для их надёжной регистрации, что позволяет проводить анализ полной совокупности экспериментальных данных.

Для реализации такого режима сжатия требуется лазерный импульс длительностью $\tau_L \leq 0,3$ нс и высокая интенсивность ЛИ на поверхности мишени — $I_L \approx$

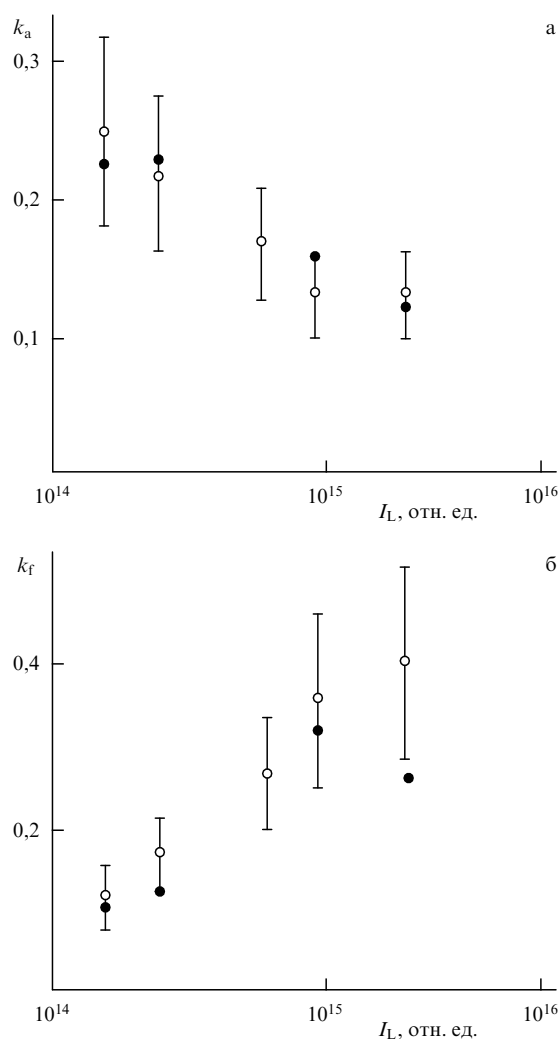


Рис. 1. Зависимость коэффициента поглощения k_a (а) и доли энергии k_f в быстрых ионах (б) от интенсивности лазерного излучения (○ — эксперимент на установке "Искра-4", ● — расчёт).

$\approx 10^{15}$ Вт см⁻². Такие параметры облучения были реализованы в экспериментах.

При выбранном уровне интенсивности ЛИ и длине волны $\lambda = 1,315$ мкм давление ЛИ (пондеромоторное давление) сравнимо с тепловым давлением плазмы, что приводит к образованию скачка плотности в точке с критической плотностью плазмы (см., например, [20–22]). В этих условиях снижается классическое тормозное поглощение ЛИ и роль нелинейных механизмов, приводящих к генерации в лазерной короне "горячих" электронов и быстрых ионов, становится определяющей.

В экспериментах [23, 24] использовались сферические стеклянные мишени диаметром 120–240 мкм, аспектным отношением $A_s = R_0/\Delta R$ (отношение начального радиуса к толщине оболочки), изменяющимся в диапазоне от 30 до 100, и начальным давлением DT-смеси $P_{DT} = 10–30$ атм. На рисунке 1 показаны результаты измерения коэффициента поглощения k_a и доли поглощённой энергии k_f , переданной быстрым ионам.

Для анализа этих экспериментов были созданы модели поглощения и генерации быстрых частиц, позволившие учесть указанные эффекты в одномерном программном комплексе радиационной газовой динамики

СНДП [25, 26] и получить удовлетворительное согласие результатов экспериментов и расчётов по коэффициентам k_a и k_f (см. рис. 1). Аналогичное согласие было достигнуто по величине плотности сжатого DT-газа ρ_f , полученного как из регистрации размера сжатого ядра на камере-обскуре, так и по линейчатому излучению неона, добавленного в DT-смесь. При этом максимальное значение ρ_f составило около 1 г см^{-3} [23].

Несмотря на хорошее описание экспериментов по энерговкладу и объёмному сжатию, экспериментальный нейтронный выход, который составлял от 10^4 до 10^6 , был в 10–100 раз ниже, чем предсказывали расчёты. Основной причиной такого различия являлись гидродинамические неустойчивости и турбулентное перемешивание, вызванное неоднородностью облучения мишени.

После модернизации и перевода установки "Искра-4" на работу на второй гармонике на ней была проведена серия экспериментов по сжатию высокоаспектных оболочек с $A_s > 200$. Была получена устойчивая генерация термоядерных нейтронов в сильной сходящейся ударной волне с рекордно высоким для установки значением — 6×10^7 нейтронов за импульс.

4. Исследования на лазерной установке "Искра-5"

Основным направлением экспериментальных исследований на установке "Искра-5" [27–41] было изучение работы мишеней непрямого облучения, состоящих из сферического медного бокса диаметром 1,3–4 мм, в центре которого помещалась стеклянная капсула, содержащая DT-газ. Эффективность системы ввода лазерного излучения внутрь бокса проверена в серии экспериментов с мишенями с обращённой короной [29]. В этих опытах была получена горячая плазма с рекордно высокой температурой ионной компоненты — около 12 кэВ. Нейтронный выход достигал значений $\approx 10^{10}$ DD-нейтронов за импульс.

Важным этапом исследований явилось изучение характеристик рентгеновского поля внутри бокса, его спектра, эффективной температуры, степени симметрии облучения центральной мишени. Для этого в экспериментах варьировались такие параметры центральной капсулы, как диаметр (от 270 мкм до 0,9 мм), толщина (от 1 до 40 мкм), начальное давление DT-газа (от 3 до 50 атм). Экспериментальные и расчётные исследования показали, что при отношении радиуса бокса к радиусу центральной капсулы в диапазоне 5–10 неоднородность рентгеновского потока на её поверхности не превышала 2–3 %.

Регистрация спектра рентгеновского излучения, генерируемого стенками бокса [37–39], показала, что спектр является неравновесным. Абсолютные измерения энергии рентгеновского излучения позволили установить, что рентгеновский поток, облучающий поверхность стеклянной капсулы, соответствует эффективной температуре 160–170 эВ.

Для анализа экспериментов потребовалось развитие одномерных и двумерных программ радиационной газовой динамики. Были разработаны методы расчёта генерации и переноса рентгеновского излучения в лазерной плазме с использованием спектрально-диффузионного приближения, а также метода кинетического уравнения. Проведённые эксперименты позволили проверить адекватность и точность как физических моделей, так и разработанных алгоритмов и расчётных программ.

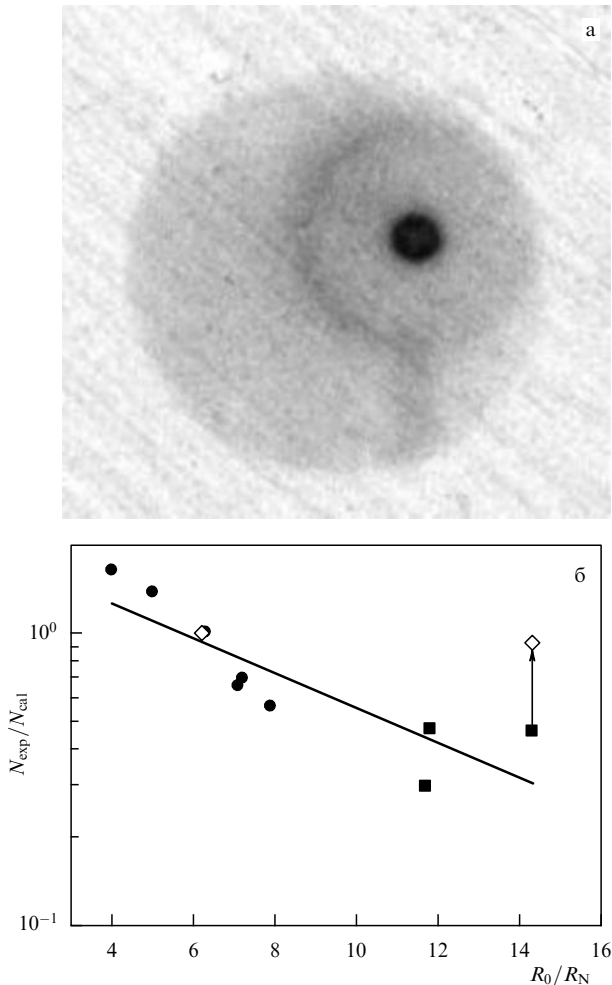


Рис. 2. (а) Обскурограмма центральной мишени, полученная в типичном эксперименте с рентгеновскими мишенями. (б) Зависимость отношения экспериментального и расчётного нейтронного выхода от расчётной степени радиального схождения центральной капсулы на момент генерации нейтронов: ● — оболочка без покрытия, ■ — оболочка с полипараксилиновым покрытием, ◇ — расчёты с учётом турбулентного перемешивания.

На рисунке 2а представлена полученная с помощью камеры-обскуры фотография рентгеновского свечения центральной мишени, которая показывает высокую степень симметрии сжатой области, что подтверждает расчётные оценки. Высокая степень симметрии позволила зарегистрировать в экспериментах плотность сжатого DT-газа на уровне $0,8 - 1,1 \text{ г см}^{-3}$ [31, 33]. Измерения времени схождения оболочки $\tau_{\gamma\gamma}$, проведённые с помощью щелевого рентгеновского фотохронографа, позволили оценить типичную скорость её движения, которая при толщине оболочки $5 - 7 \text{ мкм}$ составила около $3 \times 10^7 \text{ см с}^{-1}$.

Нейтронный выход изменялся в диапазоне $10^7 - 10^{10}$, в зависимости от параметров оболочки и условий эксперимента. Для мишени диаметром 280 мкм и толщиной оболочки 5 мкм нейтронный выход находился на уровне 3×10^9 , что отвечает температуре DT-газа $2,5 \text{ кэВ}$, измеренной с помощью времяпролётной методики.

Анализ, который проводился на основе сравнения результатов экспериментов и расчётов по одномерной программе СНДП, показал, что генерация нейтронного выхода удовлетворительно описывается в рамках сфери-

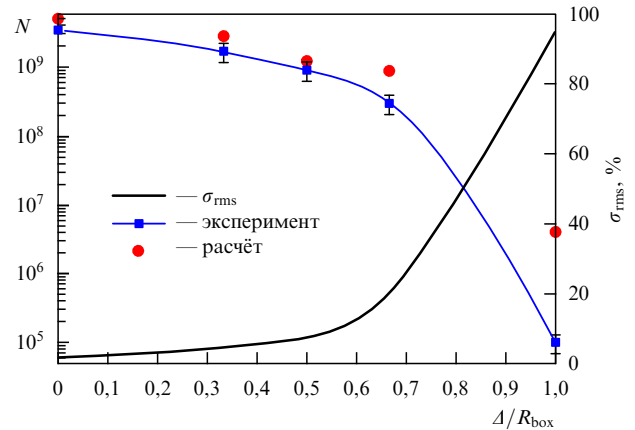


Рис. 3. Зависимость нейтронного выхода N и степени неоднородности рентгеновского поля на поверхности капсулы σ_{rms} от величины сдвига Δ мишени относительно центра бокса.

чески симметричных расчётов (рис. 2б) при объёмных степенях сжатия газа вплоть до порядка 10^3 . При больших степенях сжатия снижение нейтронного выхода по отношению к ожидаемому согласно результатам сферически симметричного расчёта может быть объяснено влиянием турбулентного перемешивания.

Высокая симметрия поля рентгеновского излучения позволила впервые в мире провести серию экспериментов по исследованию влияния асимметрии на динамику термоядерных мишеней и генерацию ими нейтронов. Изучено как влияние асимметрии в начальной геометрии мишеней [36, 40, 41], так и влияние асимметрии потока рентгеновского излучения на поверхности мишени.

Для создания контролируемой асимметрии рентгеновского поля был выбран метод, основанный на введении дополнительного отверстия в боксе и сдвиге сферической капсулы в его направлении.

Сравнение экспериментальных результатов с результатами газодинамических расчётов сжатия центральных капсул по программе "Мимоза-НД" [42, 43] при параметрах мишени и рентгеновского импульса, соответствующих эксперименту (рис. 3), позволяет констатировать качественное и количественное согласие между экспериментальными и расчётными данными в широком диапазоне изменения асимметрии рентгеновского поля [36, 44].

5. Зажигание термоядерной мишени

Ключевым вопросом ЛТС является вопрос о минимальном уровне лазерной энергии E_L , требуемой для зажигания лазерной термоядерной мишени. В [45] показано, что оптимистическая оценка E_L составляет 500 кДж при длительности импульса несколько наносекунд. Более детальная информация может быть получена с помощью газодинамических расчётов, которые учитывают совокупность физических процессов, определяющих динамику сжатия мишени.

Расчёты были проведены по программе СНДП, в которой учитываются следующие физические процессы [46]: газодинамические процессы, тормозное поглощение лазерного излучения, электронная и ионная теплопроводности, электронно-ионная релаксация, перенос рентгеновского излучения в приближении неравновесной

спектральной диффузии, кинетика ионизации плазмы в приближении среднего иона [47], кинетика термоядерных реакций с учётом переноса α -частиц в приближении многогрупповой диффузии с ограничением потока [48]. В расчётах использовалось уравнение состояния в приближении среднего иона с учётом холодного давления [49]. Физические модели, используемые в данной программе, получили подтверждение, как показано в разделах 3, 4, в экспериментах на установках "Искра-4" и "Искра-5".

Расчётная оптимизация конструкции мишени показывает, что лазерным импульсом с энергией 500 кДж удаётся зажечь термоядерную мишень, которая представляет собой пластиковую сферическую оболочку диаметром около 1,5 мм и толщиной стенки около 30 мкм. На внутреннюю поверхность оболочки наморожен слой DT-льда толщиной 25 мкм. Для обеспечения изэнтропического сжатия лазерный импульс профилирован:

$$P(t) = \begin{cases} P_0 \left(\frac{t}{t_0}\right)^{2,8} & \text{при } t < t_0, \\ P_0 & \text{при } t_0 < t < t_0 + \Delta t, \end{cases}$$

где $P(t)$ — мощность лазерного излучения, подводимого к мишени, $t_0 = 8,6$ нс, $\Delta t = 1,48$ нс, $P_0 = 1,34 \times 10^{14}$ Вт (приведённые значения выбраны исходя из радиуса и массы оболочки). Расчёты показывают, что при этом значение коэффициента усиления мишени (превышение термоядерной энергии над вложенной лазерной энергией) около 10. Выход термоядерных нейтронов составляет 2×10^{18} нейтронов за импульс, объёмное сжатие термоядерного горючего — около 10^4 , а плотность DT-смеси на момент максимального сжатия — около 100 г см^{-3} .

Неоднородность облучения мишени, отличие симметрии оболочки от сферической и разнотолщинность слоя DT-льда приводят к нарушению одномерности сжатия и тем самым к увеличению энергии, требуемой для зажигания. Условно эти факторы могут быть разделены на две группы по пространственному масштабу. К крупномасштабным неоднородностям относятся возмущения с длиной волны $(0,1 - 1)R_0$, где R_0 — начальный радиус мишени, к мелкомасштабным — возмущения с длиной волны менее $0,1R_0$.

Исследования по влиянию крупномасштабных неоднородностей проводятся во многих лабораториях в нашей стране и за рубежом (см., например, [50]). Проведём анализ этого влияния на основе двумерных расчётов по программе "Мимоза-НД" для той же термоядерной мишени, для которой выше приведены результаты одномерных расчётов. Вариацию интенсивности лазерного излучения по поверхности мишени можно задать в виде

$$I = I_0 [1 + a_l P_l(\cos \Theta)],$$

где I_0 — средняя по поверхности мишени интенсивность, $P_l(\cos \Theta)$ — полином Лежандра, a_l — амплитуда возмущения. Наиболее показательным параметром, характеризующим влияние неоднородности на зажигание мишени, является отношение величины выделившейся термоядерной энергии в результате протекания реакции термоядерного синтеза, полученной в двумерных расчётах, к аналогичному значению одномерного расчёта.

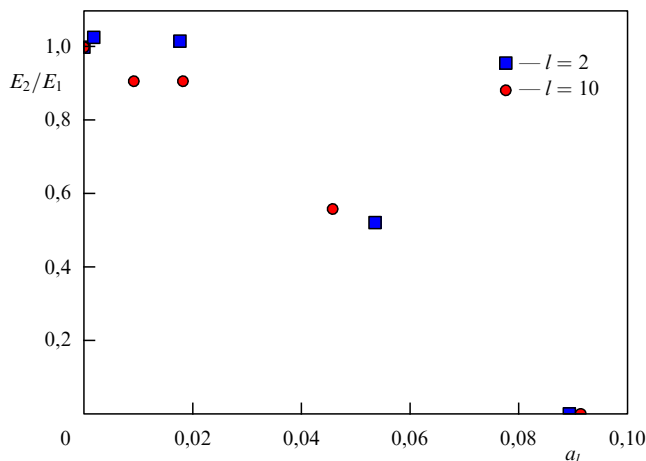


Рис. 4. Отношение величин термоядерного энерговыделения, полученных в двумерных (E_2) и одномерных (E_1) расчётах в зависимости от амплитуды крупномасштабных возмущений.

Зависимость этого параметра от амплитуды возмущения a_l для двух гармоник, $l = 2$ и $l = 10$, свидетельствует о том, что близкие величины возмущений для обеих гармоник вызывают примерно равное уменьшение величины выделившейся энергии (рис. 4). Причём снижение энерговыделения в два раза происходит при амплитуде неоднородности облучения в 5 %, а при 9%-ной неоднородности нейтронный выход практически отсутствует. Эти исследования позволяют сделать вывод о том, что когда степень объёмного сжатия достигает 10^4 , крупномасштабные неоднородности с амплитудой порядка 3 % не сказываются на динамике сжатия и горения термоядерного горючего.

Наличие мелкомасштабных неоднородностей приводит к эффективному развитию газодинамических неустойчивостей и турбулентного перемешивания. К сожалению, на современном этапе нельзя осуществить в полной мере прямое моделирование влияния этих эффектов на динамику сжатия мишеней и её зажигания. И хотя интенсивно ведутся экспериментальные и теоретические исследования, пока нет ответа на вопрос: насколько следует повысить уровень лазерной энергии, для того чтобы компенсировать потери энергии из-за неустойчивостей?

6. Лазерная установка мегаджоульного уровня энергии

Эксперименты на установке "Искра-5" выявили ограниченность её возможностей. В частности, при энергии лазерного излучения на уровне 30 кДж величина нейтронного выхода недостаточна для исследования всей совокупности режимов сжатия термоядерной мишени. В 1996 г. РФЯЦ – ВНИИЭФ выступил с предложением о создании установки мегаджоульного уровня энергии [51], на которой можно было бы провести эксперименты по зажиганию термоядерной мишени. Кроме того, данная установка должна предназначаться для изучения таких проблем, как перенос энергии рентгеновским излучением в замкнутых объёмах, спектроскопия горячей плотной плазмы, определение спектральных коэффициентов поглощения рентгеновского излучения равновесной плазмой, радиационная газовая динамика несимметричных течений, установление уравнений состояния веществ в области давлений 10 и 100 млн атм, развитие гидроди-

намических неустойчивостей и турбулентного перемешивания на контактных границах.

Анализ различных вариантов построения установки такого класса показал, что технология неодимовых лазеров, значительно продвинувшаяся в 1970-х – 1980-х годах, обеспечивала существенно большие возможности увеличения к.п.д. и, соответственно, уменьшения размеров установки. Отличительной особенностью таких установок стал многопроходный (четырёхпроходный) силовой каскад с секционированной апертурой и активными элементами прямоугольной формы (так называемыми слэбами, от англ. slab — плита) из фосфатного стекла. Такая конфигурация позволяет существенно повысить к.п.д. усилителя и устраняет необходимость в большом числе каскадов промежуточного усиления.

На первом этапе для проверки и отработки основных научно-технических решений в РФЯЦ – ВНИИЭФ была создана четырёхканальная неодимовая установка "Луч" [52]. Выбранная оптическая схема канала установки "Луч" во многом аналогична схеме установок NIF (National Ignition Facility) [53] и LMJ (Laser Mégajoule) [54]. Для повышения к.п.д. лазера используется схема усиления, в которой импульс четыре раза проходит через активные лазерные элементы (неодимовые пластины), благодаря чему повышается энергоёмкость запасённой в них энергии. Кроме того, лазерные каналы объединяются в блоки с единой системой накачки, содержащей ксеноновые лампы-вспышки, что также повышает к.п.д. системы. Схема усиления установки "Луч" имеет два силовых усилителя, в каждом из которых располагается девять неодимовых пластин. В поперечном сечении лазерный пучок представляет собой квадрат размером 20×20 см. Для подавления самовозбуждения лазерного канала второй и третий проходы усиления разделены ячейкой Поккельса, а для повышения качества лазерного пучка используется специальная адаптивная система.

Исследования [55] показали, что лучевая прочность отечественных оптических элементов тракта установки, в том числе пластин из Nd-фосфатного стекла [56], позволяет работать в режиме, в котором средняя плотность выходной энергии составляет $\varepsilon \approx 10$ Дж см^{-2} . Расчёты усиления лазерного импульса установили, что для достижения такого уровня ε необходим коэффициент усиления $g \approx 0,04 - 0,05 \text{ см}^{-1}$, при этом выходная энергия одного канала должна составлять 3 – 3,5 кДж. Эксперименты [57] продемонстрировали, что выбранная конструкция усилителей обеспечивает требуемую величину g . Данные результаты, а также получение требуемых режимов работы на всех системах установки позволили достичь в экспериментах расчётно ожидаемой энергии в одном канале установки — 3,3 кДж (рис. 5) [58].

Отличительной особенностью конденсаторной батареи установки "Луч" с энергозапасом 4,7 МДж при напряжении 24 кВ является то, что в качестве коммутаторов впервые в мировой практике при создании мощного лазера использованы полупроводниковые реверсивно включаемые динисторы (РВД) [59], обладающие очень высокими коммутационными характеристиками.

Полученные результаты свидетельствовали о правильности выбранных научно-технических решений. Дальнейшие исследования, направленные на совершенствование основных систем установки, включая разработку большеапертурной ячейки Поккельса с плазмен-

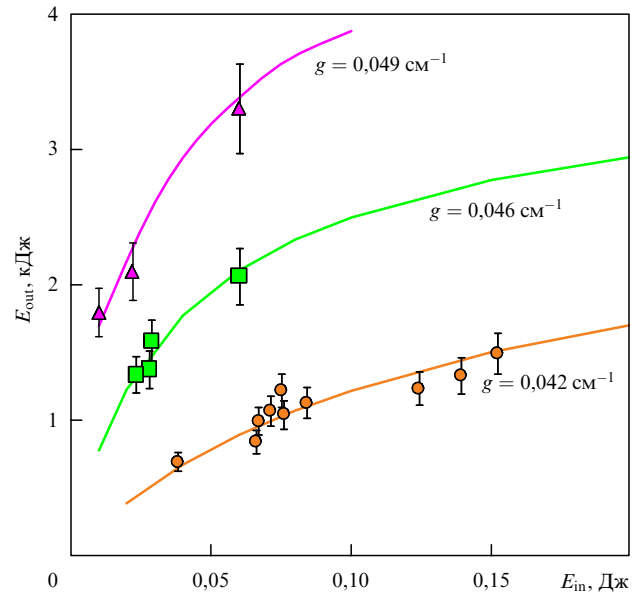


Рис. 5. Зависимость выходной лазерной энергии E_{out} в одном канале установки от энергии на входе в силовые усилители E_{in} при различных значениях коэффициента усиления g . Символами показаны результаты эксперимента, кривыми — результаты расчёта.

ными электродами [60], развитие технологии изготовления Nd-пластин с увеличенной апертурой [61] и применение новых алгоритмов работы адаптивной системы [62], позволили сформулировать концепцию построения установки со следующими параметрами: лазерная энергия на уровне 2,8 МДж при длине волны 0,53 мкм и длительности импульса 3–5 нс. Апертура лазерного пучка составляет 40×40 см, число каналов усиления — 192. В настоящее время в РФЯЦ – ВНИИЭФ разрабатывается технический проект такой установки.

Наряду с работами по изучению физики усиления лазерного излучения, на установке "Луч" проводятся исследования физики поведения вещества в экспериментальных состояниях. В частности, развивается методика проведения экспериментов по изучению ударной сжимаемости. На рисунке 6а приведена принципиальная схема экспериментов, а на рис. 6б представлена полученная $P-U$ -диаграмма сжимаемости свинца. Отметим, что в лазерных экспериментах достигнуто давление более 50 Мбар.

7. Петаваттный лазерный комплекс

В последние годы наблюдается стремительный прогресс в разработке и создании твердотельных лазерных систем с импульсами фемтосекундной длительности. В ведущих лазерных лабораториях вступили в строй установки субпетаваттного и петаваттного уровней мощности с длительностью лазерного импульса 100–500 фс (см., например, [63]). При таких уровнях мощности в сфокусированном пучке достижима интенсивность $10^{18} - 10^{22}$ Вт см^{-2} .

Появление нового инструмента привело к развитию целого ряда исследовательских направлений: генерация быстрых электронов и ионов, включая генерацию протонных пучков; генерация жёсткого рентгеновского излучения; иницирование ядерных реакций и др. Рассматривается возможность "быстрого" зажигания термоядерной мишени при одновременном воздействии лазер-

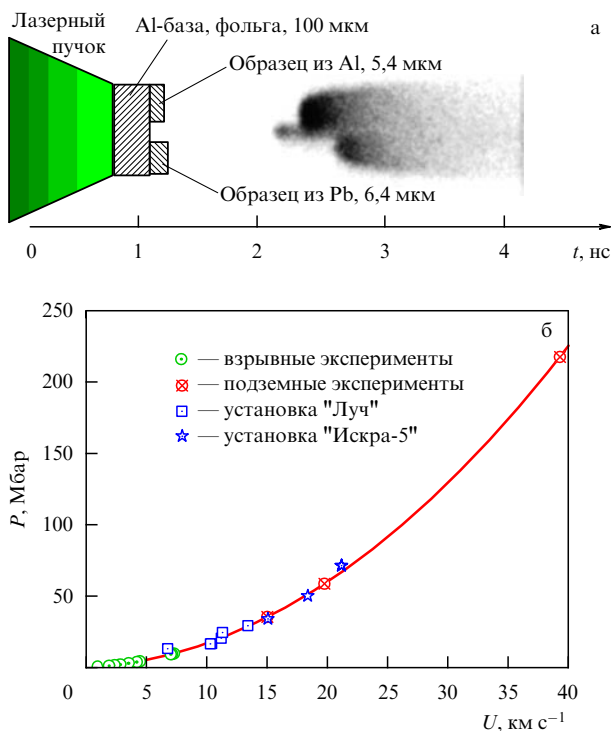


Рис. 6. Исследования по ударной сжимаемости свинца на установке "Луч": (а) схема проведения экспериментов, (б) $P-U$ -диаграмма.

ного излучения с наносекундной и фемтосекундной длительностью.

В настоящее время рассматриваются два основных подхода для достижения петаваттного уровня лазерной мощности. В первом из них лазерный импульс с фемтосекундной длительностью и энергией порядка 1 нДж растягивают до наносекундной длительности с помощью дисперсионной оптической системы — дифракционной решётки (стретчера). Далее импульс можно усиливать хорошо известными методами. После набора требуемой энергии импульс сжимают во времени с помощью другой оптической системы (компрессора), также состоящей из дифракционных решёток. Если спектральный состав импульса излучения при усилении не искажается, то длительность импульса можно сократить до исходной.

Однако усилительная система на неодимовом фوسفатном стекле искажает (сужает) спектр лазерного импульса, и на выходе таких петаваттных систем удаётся получить лазерный импульс длительностью 0,5–1 пс.

Другая схема основывается на применении параметрических усилителей с существенно более широкой полосой усиления. Идея подобной лазерной системы применительно к более низким уровням мощности излучения, по-видимому, впервые была сформулирована советскими учёными более 25 лет назад [64]. Однако только сегодня в связи с созданием фемтосекундных лазеров с длительностью импульсов до 10 фс и нелинейных кристаллов с апертурой до 40 см стала возможна реализация этой идеи для получения рекордно высоких, мультипетаваттных, уровней мощности [65].

Такая система была реализована на установке "Луч" в совместных исследованиях РФЯЦ–ВНИИЭФ и Института прикладной физики РАН. Параметрические усилители в этой системе созданы на основе большеапертур-

ных кристаллов DKDP. К настоящему времени достигнута выходная мощность 1 ПВт [7]. В экспериментах получена энергия на выходе установки около 50 Дж при длительности сжатого импульса около 45 фс и диаметре пучка 7,4 см.

8. Заключение

Лазерная стендовая база, созданная в РФЯЦ–ВНИИЭФ, уникальна. Она является достоянием научного сообщества России и открыта для проведения исследований в области физики высоких плотностей энергии специалистами различных научных институтов России.

Создание мощных лазерных установок в РФЯЦ–ВНИИЭФ и проведение на них экспериментов по физике высоких плотностей энергии способствует развитию в России технологий в области лазерной техники, оптики, импульсной энергетики и измерительной техники.

Список литературы

1. Басов Н Г, Крохин О Н *ЖЭТФ* **46** 171 (1964) [Basov N G, Krokhin O N *Sov. Phys. JETP* **19** 123 (1964)]
2. Nuckolls J et al. *Nature* **239** 139 (1972)
3. Басов Н Г и др. *Письма в ЖЭТФ* **26** 581 (1977) [Basov N G et al. *JETP Lett.* **26** 433 (1977)]
4. Кормер С Б *Изв. АН СССР. Сер. физ.* **44** 2002 (1980)
5. Анненков В И и др. *Квантовая электроника* **18** 536 (1991) [Annenkov V I et al. *Sov. J. Quantum Electron.* **21** 487 (1991)]
6. Безнасюк Н Н и др. *Труды РФЯЦ–ВНИИЭФ* (3) 232 (2002)
7. Андреев Н Ф и др. *Письма в ЖЭТФ* **79** 178 (2004) [Andreev N F et al. *JETP Lett.* **79** 144 (2004)]
8. Gensel P, Hohla K, Kompa K L *Appl. Phys. Lett.* **18** 48 (1971)
9. Басов Н Г и др. *Квантовая электроника* **6** (18) 116 (1973) [Basov N G et al. *Sov. J. Quantum Electron.* **3** 524 (1973)]
10. Гайдаш В А и др. *Письма в ЖЭТФ* **20** 243 (1974) [Gaidash V A et al. *JETP Lett.* **20** 107 (1974)]
11. Кормер С Б *Изв. АН СССР. Сер. физ.* **44** 2003 (1980)
12. Aldridge F T *Appl. Phys. Lett.* **22** 180 (1973)
13. Palmer R, Gusinow M *IEEE J Quantum Electron.* **10** 615 (1974)
14. Baker H J, King T A *J. Phys. D* **8** L31 (1975)
15. Безуглов В Г и др. *ПТЭ* (3) 100 (1991)
16. Васильев А С и др. *Изв. АН СССР. Сер. физ.* **54** 2027 (1990)
17. Анненков В И и др. *Квантовая электроника* **35** 993 (2005) [Annenkov V I et al. *Quantum Electron.* **35** 993 (2005)]
18. Storm E K et al. *J. Appl. Phys.* **49** 959 (1978)
19. Бельков С А и др. *Вопр. атом. науки и тех. Теор. и прикл. физика* (2) 25 (1990)
20. Attwood D T et al. *Phys. Rev. Lett.* **40** 184 (1978)
21. Силин В П *УФН* **145** 225 (1985) [Silin V P *Sov. Phys. Usp.* **28** 136 (1985)]
22. Бельков С А и др. *Квантовая электроника* **19** 1187 (1992) [Bel'kov S A et al. *Sov. J. Quantum Electron.* **22** 1109 (1992)]
23. Бельков С А и др. *ЖЭТФ* **97** 834 (1990) [Bel'kov S A et al. *Sov. Phys. JETP* **70** 467 (1990)]
24. Бельков С А и др. *ЖЭТФ* **101** 80 (1992) [Bel'kov S A et al. *JETP* **74** 43 (1992)]
25. Долголева Г В *Вопр. атом. науки и тех. Алгоритмы и методы численного решения задач мат. физики* (2) 29 (1983)
26. Бельков С А и др. *Вопр. атом. науки и тех. Мат. моделир. физ. процессов* (1) 76 (1990)
27. Kochemasov G G, in *Laser Interaction with Matter: Proc. of the 23rd European Conf., Oxford, 19–23 September 1994* (Ed. S J Rose) (Bristol: IOP, 1995)
28. Бессараб А В и др. *ЖЭТФ* **102** 1800 (1992) [Bessarab A V et al. *JETP* **75** 970 (1992)]
29. Абзаев Ф М и др. *Письма в ЖЭТФ* **58** 28 (1993) [Abzaev F M et al. *JETP Lett.* **58** 28 (1993)]
30. Абзаев Ф М и др. *ЖЭТФ* **114** 155 (1998) [Abzaev F M et al. *JETP* **87** 87 (1998)]
31. Бельков С А и др. *ЖЭТФ* **114** 837 (1998) [Bel'kov S A et al. *JETP* **87** 454 (1998)]
32. Bel'kov S A et al. *Laser Part. Beams* **17** 591 (1999)
33. Bel'kov S A et al. *Laser Part. Beams* **17** 377 (1999)
34. Bel'kov S A et al. *Laser Part. Beams* **17** 385 (1999)
35. Bel'kov S A et al. *Laser Part. Beams* **17** 597 (1999)
36. Бельков С А и др. *Письма в ЖЭТФ* **67** 161 (1998) [Bel'kov S A et al. *JETP Lett.* **67** 171 (1998)]
37. Бессараб А В и др. *Физика плазмы* **20** 90 (1994)

38. Бельков С А и др. *Квантовая электроника* **21** 271 (1994) [Bel'kov S A et al. *Quantum Electron.* **24** 253 (1994)]
39. Бельков С А и др. *Физика плазмы* **24** 154 (1998) [Bel'kov S A et al. *Plasma Phys. Rep.* **24** 133 (1998)]
40. Mkhitarian L S et al., in *Inertial Fusion Sciences and Applications 99* (Eds C Labaune, W J Hogan, K A Tanaka) (Paris: Elsevier, 2000) p. 142
41. Мхитарьян Л С и др. *Труды РФЯЦ – ВНИИЭФ* (1) 300 (2001)
42. Афанасьева Е А и др., в сб. *Конструирование алгоритмов и решение задач математической физики* (Под ред. Г П Воскресенского, А В Забродина) (М.: ИПМ АН СССР, 1989) с. 277
43. Софронов И Д и др. *Вопр. атом. науки и тех. Мат. моделир. физ. процессов* (1) 8 (2000)
44. Mkhitarian L S et al. *Laser Part. Beams* **18** 237 (2000)
45. Ильякаев Р И, Гаранин С Г *Вестн. РАН* **76** 503 (2006) [Il'kaev R I, Garanin S G, *Herald Russ. Acad. Sci.* **76** 282 (2006)]
46. Бельков С А, Долголева Г В *Вопр. атом. науки и тех. Мат. моделир. физ. процессов* (1) 59 (1992)
47. Бельков С А и др. *ЖЭТФ* **111** 496 (1997) [Bel'kov S A et al. *JETP* **84** 272 (1997)]
48. Бельков С А, Долголева Г В, Ермолович В Ф *Вопр. атом. науки и тех. Мат. моделир. физ. процессов* (1) 51 (2003)
49. Бельков С А, Бондаренко С В, Митрофанов Е И *Квантовая электроника* **30** 963 (2000) [Bel'kov S A, Bondarenko S V, Mitrofanov E I *Quantum Electron.* **30** 963 (2000)]
50. Lindl J, Preprint LLNL, UCRL-JC-119015, L19821-1 (1995)
51. Galakhov I V et al. *Fusion Eng. Design* **44** 51 (1999)
52. Sukharev S A *Proc. SPIE* **3492** 12 (1999)
53. Paisner J A et al. *Proc. SPIE* **2633** 2 (1995)
54. Andre M L *Proc. SPIE* **3047** 38 (1997)
55. Арбузов В И и др. *Опт. журн.* **69** (1) 16 (2002) [Arbuzov V I et al. *J. Opt. Technol.* **69** 13 (2002)]
56. Алексеев В Н и др. *Опт. журн.* **69** (1) 11 (2002) [Alexseev V N et al. *J. Opt. Technol.* **69** 9 (2002)]
57. Воронич И Н и др. *Квантовая электроника* **33** 485 (2003) [Voronich I N et al. *Quantum Electron.* **33** 485 (2003)]
58. Гаранин С Г и др. *Квантовая электроника* **35** 299 (2005) [Garanin S G et al. *Quantum Electron.* **35** 299 (2005)]
59. Chumakov G D et al., in *Proc. of the Xth IEEE Intern. Pulsed Power Conf., Albuquerque, NM, USA, 1995*
60. Андреев Н Ф и др. *Квантовая электроника* **34** 381 (2004) [Andreev N F et al. *Quantum Electron.* **34** 381 (2004)]
61. Арбузов В И и др. *Опт. журн.* **70** (5) 68 (2003) [Arbuzov V I et al. *J. Opt. Technol.* **70** 361 (2003)]
62. Воронич И Н и др. *Квантовая электроника* **35** 140 (2005) [Voronich I N et al. *Quantum Electron.* **35** 140 (2005)]
63. Крюков П Г *Квантовая электроника* **31** 95 (2001) [Kryukov P G *Quantum Electron.* **31** 95 (2001)]
64. Пискарскас А, Стабинис А, Янкаускас А *УФН* **150** 127 (1986) [Piskarskas A, Stabinis A, Yankauskas A *Sov. Phys. Usp.* **29** 869 (1986)]
65. Андреев Н Ф и др. *Письма в ЖЭТФ* **79** 178 (2004) [Andreev N F et al. *JETP Lett.* **79** 144 (2004)]

PACS numbers: 07.55.Db, **64.30.** – t, **74.25.** – q
DOI: 10.3367/UFNr.0181.201104n.0441

Физические исследования в сверхсильных магнитных полях

Г.В. Борисков, А.И. Быков, М.И. Долотенко,
Н.И. Егоров, Ю.Б. Кудасов, В.В. Платонов,
В.Д. Селемир, О.М. Таценко

1. Введение

История достижений Всероссийского научно-исследовательского института экспериментальной физики (ВНИИЭФ) в области генерации и применений сверх-

Г.В. Борисков, А.И. Быков, М.И. Долотенко, Н.И. Егоров,
Ю.Б. Кудасов, В.В. Платонов, В.Д. Селемир, О.М. Таценко.
ФГУП "Российский федеральный ядерный центр — Всероссийский
научно-исследовательский институт экспериментальной физики",
г. Саров, Нижегородская обл., РФ
E-mail: selemir@vniief.ru

сильных магнитных полей (ССМП) в фундаментальных физических исследованиях начинается с 1952 г., когда А.Д. Сахаров выдвинул [1] идею магнитной кумуляции как одного из возможных путей осуществления импульсной управляемой термоядерной реакции. Им же были предложены [1, 2] два типа магнитокумулятивных генераторов — сверхсильных магнитных полей (МК-1) и энергии (МК-2). В первом из них в полости цилиндрической металлической оболочки (лайнере) отдельным устройством создается начальный поток аксиального магнитного поля. В окружающем лайнер кольцевом заряде взрывчатого вещества (ВВ) инициируется сходящаяся волна детонации так, чтобы она вышла на внешнюю границу лайнера в момент достижения в нём максимума начального магнитного поля. Под действием давления продуктов детонации лайнер схлопывается к центру, сжимая начальный магнитный поток. При достаточно быстром сжатии поток в полости сохраняется и магнитное поле на оси лайнера возрастает обратно пропорционально квадрату радиуса лайнера, достигая величины мегагауссного диапазона. Химическая энергия взрывчатого вещества преобразуется в энергию магнитного поля через кинетическую энергию лайнера.

Активные, предпринимавшиеся во многих странах попытки добиться стабильного получения сверхсильных магнитных полей взрывным сжатием магнитного потока выявили необъяснимые трудности в получении полей величиной более 3 МГс, что привело к свёртыванию работ в этой области.

2. Каскадный генератор МК-1

Группа сотрудников ВНИИЭФ под руководством А.И. Павловского выдвинула и реализовала ряд идей, дополнивших и развивших идею магнитной кумуляции, и решила задачу воспроизводимого генерирования ССМП.

Во-первых, было предложено изготавливать оболочки генератора МК-1 из материала с управляемой электропроводностью. В исходном состоянии такой материал или является вообще непроводящим, или проводит ток только в каком-то одном направлении. В нужный момент по материалу пропускается ударная волна, и он становится проводящим во всех направлениях. Один из вариантов такого материала изготавливается из плотноупакованных параллельных изолированных медных проволок, склеенных эпоксидным компаундом.

Во-вторых, была создана уникальная конструкция соленоидов начального магнитного поля генератора МК-1 в виде цилиндра из такого композитного материала, во внутреннем слое которого проволоки образуют многозаходный (≈ 500 проволок-заходов) многослойный (7–13 слоёв намотки) соленоид (рис. 1). Это позволило надёжно получать большие магнитные потоки и использовать соленоид в качестве лайнера: после прохождения ударной волны от заряда ВВ проволоки замыкаются и образуется сплошной проводящий цилиндр, захватывающий и сжимающий магнитный поток [3].

В-третьих, благодаря тому что большой начальный магнитный поток в проволочном соленоиде позволил получать ССМП в больших объёмах, рентгенографированием продольного сечения генератора МК-1 экспериментально было доказано, что основным ограничением величины магнитного поля является неустойчивость