

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, Garaniin 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) [Garaniin 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 (лайнера) 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

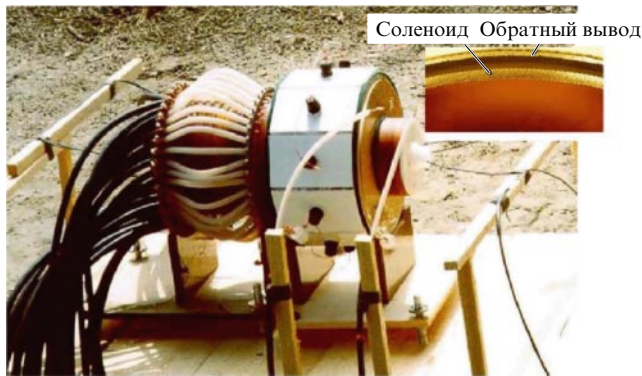


Рис. 1. Внешний вид подготовленного к взрывному эксперименту каскадного генератора МК-1. На вставке приведён фрагмент поперечного сечения соленоида-оболочки генератора МК-1.

границы вещество–поле при торможении оболочки давлением усиленного магнитного поля [4].

В-четвёртых, был предложен каскадный принцип усиления магнитного поля, что позволило преодолеть это ограничение, приостановить развитие неустойчивостей и добиться воспроизводимой генерации многомегагауссных полей [5, 6]. Соосно с соленоидом-оболочкой размещаются одна-две цилиндрических оболочки-каскады из того же композита. В исходном состоянии оболочки-каскады свободно пропускают внутрь поток усиленного магнитного поля, но каждый раз, когда возникает угроза потери устойчивости внутренней границы лайнера, он заменяется новым, которому и передаётся функция сжатия потока при возникновении проводимости в материале каскада после удара каскада по каскаду.

В результате многолетней работы был разработан и доведён до стадии серийного изготовления каскадный генератор МК-1 магнитных полей 10-мегагауссного диапазона (см. рис. 1) [7, 8]. Исходные параметры генератора: начальный внутренний диаметр оболочки 139 мм, масса ВВ 16 кг, начальное магнитное поле до 250 кГс. Второй и третий каскады генератора, имеющие внутренние и внешние диаметры 28 и 35 мм и 12 и 17 мм соответственно, могут изготавливаться из проволоочного композита или композита на основе мелкодисперсного порошка металла и полимерной связующей [9].

Этот генератор — достаточно простое, приспособленное для взрывных экспериментов и относительно недорогое устройство, доведённое до уровня серийного прибора (к настоящему времени изготовлено несколько сотен таких генераторов), с предельными, рекордными, характеристиками. Относительно большие объёмы ССМП допускают проведение исследований нескольких образцов одновременно и при криогенных температурах, а цилиндрическая геометрия и "прозрачность" магнитного поля позволяют изучать свойства вещества в экстремальных условиях с применением различных методик, включая оптические. Разработанный генератор применялся в различных исследованиях, в том числе в международных сериях экспериментов "Дирак" в США и "Капица" в Научно-техническом центре физики высоких плотностей энергии направленных потоков излучения ВНИИЭФ [10, 11].

В созданном во ВНИИЭФ "большом" генераторе МК-1 с увеличенными примерно в два раза габаритами

заряда ВВ (масса ВВ увеличена примерно в восемь раз) применена однокаскадная газодинамическая система ускорения лайнера со стальным ударником, и в нескольких экспериментах регистрировались магнитные поля величиной около 20 МГс, а в одном эксперименте удалось зарегистрировать рекордно высокое значение поля: около 28 МГс (плотность энергии поля ≈ 3 МДж см⁻³!) [12]. Опыт работы с большими генераторами показал, что такие эксперименты являются гораздо более сложными и дорогими, и затраты на их проведение должны быть оправданы научной ценностью проводимых с их помощью исследований.

3. Физика твёрдого тела в сверхсильных магнитных полях

ССМП являются эффективным средством исследований в физике твёрдого тела. Часть результатов, выполненных авторами исследований с помощью ССМП, создаваемых генератором МК-1, представлена в обзорах [13, 14].

Значительный интерес к ССМП возник сразу же после открытия высокотемпературной сверхпроводимости (ВТСП), так как высоким критическим температурам должны соответствовать и большие критические поля B_c , которые являются фундаментальной характеристикой сверхпроводящего состояния. Интересны и фазовые переходы между различными состояниями самой сверхпроводящей фазы (например, переход "вихревое стекло – вихревая решётка"). Наши первые эксперименты показали, что критическое поле при температуре 4,2 К в $YBa_2Cu_3O_{7-x}$ превышает 200 Тл [15]. Разработанные затем бесконтактные высокочастотные методики измерения комплексной проводимости позволили выполнить высококачественные измерения проводимости плёнок $YBa_2Cu_3O_{7-x}$ в ССМП при ориентации кристаллографической оси c перпендикулярно вектору магнитного поля в совместной российско-американской серии экспериментов ВНИИЭФ и Лос-Аламосской национальной лаборатории (ЛАНЛ) [16]. Из рисунка 2 видно, что при низких температурах в слабых полях доминировала мнимая часть проводимости плёнки, т.е. вихри находились на центрах пиннинга. В поле ≈ 75 Тл (точка А) началось быстрое увеличение вещественной части проводимости и уменьшение её мнимой части. Это связано с плавлением решётки. В полях выше 210 Тл остаётся только небольшая часть запиннигованных вихрей (в проводимости имеется мнимая часть), образец находится преимущественно в режиме вязкого движения потока. Исчезновению мнимой части проводимости и выходу её вещественной части на плато (точка С) соответствует второе критическое поле $B_{c2}(8 \pm 3 \text{ К}) = 340 \pm 40$ Тл.

Исследование полупроводников в сверхсильных магнитных полях позволяет изучать структуру энергетических зон в интервале от нескольких десятков до нескольких сотен мэВ, исследовать образцы с низкой подвижностью носителей или высокой концентрацией дефектов или примесей. Как правило, в таких экспериментах удаётся определить эффективные массы электрона в зоне проводимости, параметры Латтинджера для валентной зоны и значения g -фактора для электронов и дырок. Все эти величины являются функциями энергии электрона, которые можно определить только в сверхсильных магнитных полях. (В слабых полях можно измерить значения этих функций, соответствующие

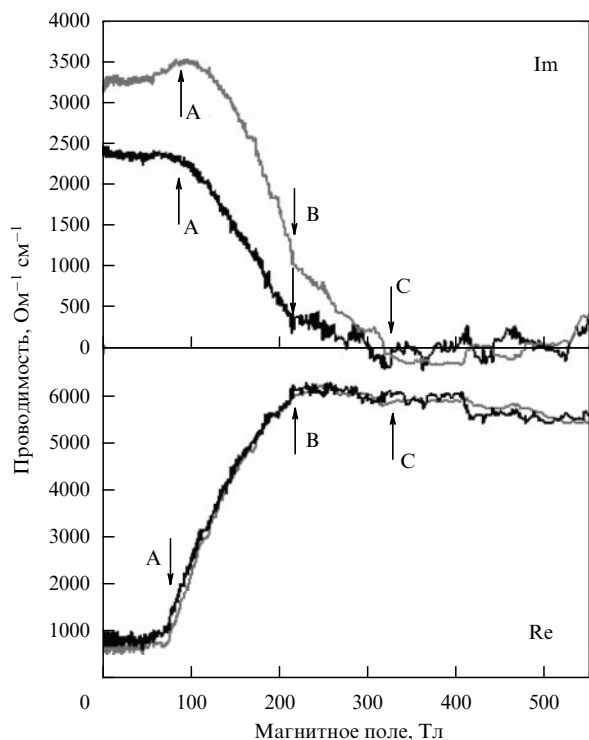


Рис. 2. Комплексная проводимость $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$ на частоте 94 ГГц (светлая кривая — данные по пропусканию сигнала, тёмная — по отражению).

краям зон, поскольку циклотронная энергия много меньше ширины зон.)

В совместных экспериментах с группой М. фон Ортенберга из Берлинского университета им. Гумбольдта измерялся циклотронный резонанс (ЦР) в перспективном, с точки зрения его применения в излучающих приборах, кубическом широкозонном полупроводнике GaN, электронные свойства которого в этой фазе мало изучены из-за отсутствия высокочистых образцов и низкой подвижности носителей. Были обнаружены три резонансных пика в полях 90, 270 и 410 Тл, что позволило определить эффективные массы и дисперсию электронных состояний [17].

В гетероструктурах InGaAs/GaAs с квантовыми ямами (КЯ) изучался фундаментальный ЦР дырок и межзонное магнетопоглощение. Исследуемые гетероструктуры были выращены в Институте физики микроструктур РАН (Н. Новгород). При измерении пропускания на длине волны $\lambda = 0,87$ мкм, что точно соответствует ширине запрещённой зоны GaAs (энергия кванта 1,425 эВ), образец становится прозрачным лишь в поле 50 Тл. По этой же причине при $\lambda = 0,82$ мкм образец становится прозрачным при величине поля 150 Тл, хотя расчёт с учётом экситонных эффектов даёт величину 100 Тл [18]. В больших полях наблюдаются полосы поглощения в диапазоне от 230 Тл до 350 Тл. Они обусловлены переходами с двух верхних (расщеплённых по спину) уровней Ландау в первой дырочной подзоне на два нижних уровня Ландау в первой электронной подзоне и такими же переходами между вторыми подзонами (сдвинутыми примерно на 50 Тл в область меньших полей), с учётом экситонных эффектов. Эти же переходы между первыми подзонами при $\lambda = 0,87$ мкм ответственны за наблюдаемый минимум пропускания при

150 Тл и особенность при 210 Тл. Обнаруженная в этих экспериментах линия циклотронного поглощения при значении магнитного поля $B \approx 80$ Тл может быть связана с межподзонным ЦР, а именно с переходом с уровня $3a_1$ — верхнего уровня Ландау дырок в КЯ в первой дырочной подзоне — на уровень $4a_3$, относящийся к третьей подзоне.

Среди семейства узкозонных полупроводников необычными свойствами выделяется моносилцид железа FeSi. Например, в оптической спектроскопии широко обсуждается нарушение правила сумм в FeSi: металлизация при повышении температуры наступает значительно раньше, чем этого можно было бы ожидать из зонных расчётов и т.д. Поскольку зеemanовское расщепление в ССМП соизмеримо с шириной запрещённой зоны в спектре s-, p- и d-электронов FeSi, равной 0,11 эВ, поля, превышающие 100 Тл, могут привести к кардинальной перестройке электронного спектра и станут, таким образом, мощным инструментом для исследования электронной структуры узкозонных полупроводников.

Для исследования намагниченности в экспериментах с МК-1 очень удобным оказался индукционный метод с использованием компенсационных катушек [19]. Величина индуцируемого сигнала пропорциональна дифференциальной намагниченности, умноженной на скорость нарастания магнитного поля, которая в МК-генераторе достигает рекордно высокого значения ($\approx 10^6$ Тл с^{-1}), обеспечивая высокую чувствительность датчиков во всём диапазоне измерений. В импульсных магнитных полях индуцируются, наряду с намагниченностью, диамагнитные токи, что позволило измерять и проводимость. Для этого используются два типа образцов: в виде чистого порошка FeSi (монокристалл растирался в фарфоровой ступке до получения гранул размером ≈ 100 мкм) и в виде смеси монокристаллического порошка с полимеризованным полиметилметакрилатом (монокристаллические гранулы FeSi в диэлектрической матрице).

В эксперименте при температуре образца $T = 4,2$ К резкий пик сигнала (рис. 3) в обоих образцах при значении поля 355 ± 20 Тл указывает на переход в

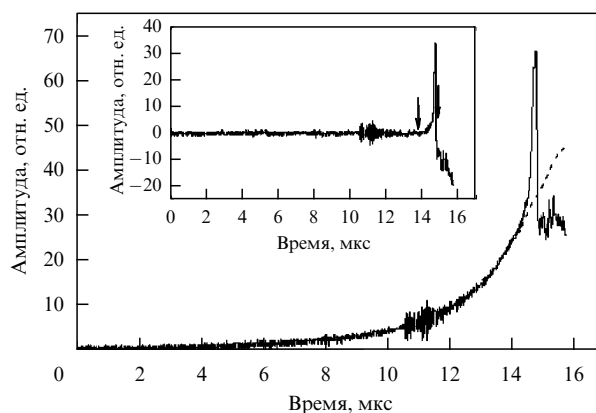


Рис. 3. Сигнал индукционного датчика с порошком FeSi при начальной температуре 4,2 К (сплошная кривая) и масштабированный сигнал индукционного датчика поля (штриховая кривая). На вставке — сигнал, очищенный от фона $\propto \partial B/\partial t$; стрелки указывают интервал интегрирования для определения скачка магнитного момента.

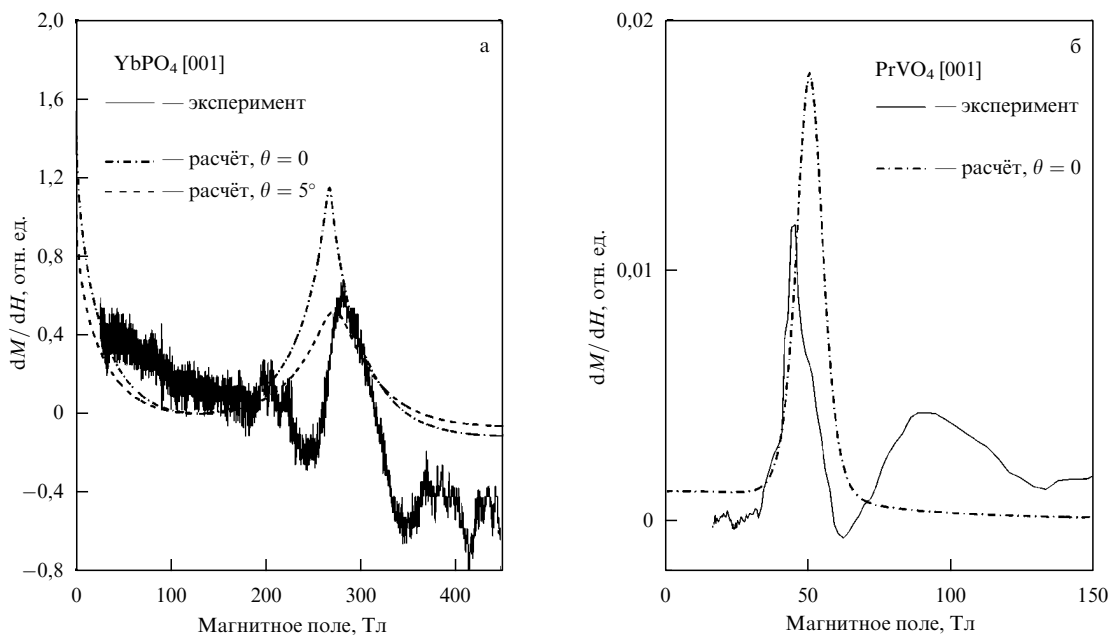


Рис. 4. Зависимости дифференциальной восприимчивости dM/dH для YbPO_4 (а) и PrVO_4 (б) для ориентации магнитного поля вблизи тетрагональной оси [001] (θ — угол разориентации).

проводящую фазу [19]. Вычисленный скачок магнитного момента равен $(0,95 \pm 0,2) \mu_B$ на атом Fe, что указывает на достижение насыщения в результате одиночного перехода, а не двух последовательных фазовых переходов, предсказываемых в ряде теоретических работ.

Основным объектом исследования в магнетиках являлись процессы переориентации спинов в сверхсильных магнитных полях. Исследованы спин-флип- и спин-флоп-переходы в антиферромагнетиках MnF_2 , KMnF_3 , FeVO_3 , ступенчатая кривая намагниченности многоподрешёточного магнетика $\text{Ho}_{0,7}\text{Y}_{2,3}\text{Fe}_5\text{O}_{12}$ [20]. Магнитное поле может деформировать электронную структуру основного состояния, что приводит к индуцированному зонному магнетизму.

Исследования эффекта пересечения уровней (кроссовера) в парамагнитных цирконах YbPO_4 , TmPO_4 , ErVO_4 , PrVO_4 были выполнены при температуре 4,2 К индукционным методом в полях величиной до 400 Тл [21, 22]. На рисунке 4 приведены экспериментальная и теоретические зависимости магнитной восприимчивости dM/dH для YbPO_4 при направлении магнитного поля вдоль тетрагональной оси [001]. Широкие максимумы восприимчивости при $B_c \approx 280$ Тл и $B_c \approx 50$ Тл связаны соответственно с пересечением энергетических уровней ионов Yb^{3+} и Pr^{3+} . Расчёты изотермической и адиабатической намагниченности YbPO_4 позволили определить изменение температуры образца в эксперименте. Образец сначала нагревается примерно на 25 К, а затем в области полей кроссовера охлаждается примерно на 20 К. Знак "элементарного" магнитокалорического эффекта определяется знаком производной $\partial M/\partial T|_{H=\text{const}}$.

ССМП в некоторых соединениях, содержащих редкоземельные ионы Ce, Sm, Eu, Tm и Yb, могут индуцировать смену валентности. Такое поведение соединений обусловлено расположением 4f-уровня вблизи уровня Ферми. В частности, состояние со смешанной валентностью возникает в растворах EuNi_2Si_2 и EuNi_2Ge_2 . В соединении EuNi_2Si_2 ион Eu^{3+} с конфигурацией $4f^6$

является немагнитным, тогда как в EuNi_2Ge_2 магнитный момент иона Eu^{2+} с конфигурацией $4f^7$ равен $7 \mu_B$. В соединениях $\text{EuNi}_2(\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x)_2$ индуцируется валентный переход из состояния преимущественно трёхвалентных ионов в состояние преимущественно двухвалентных ионов, сопровождающийся скачком магнитного момента. Для этих соединений экспериментально определены поля магнитоиндуцированных валентных переходов для диапазона концентраций Ge вплоть до $x = 0,5$. Во всём диапазоне концентраций критическое поле B_c линейно увеличивается с уменьшением концентрации [23].

Исследования эффекта Фарадея в галлате-гранате тербия $\text{Tb}_3\text{Ga}_5\text{O}_{12}$ (энергетический спектр его магнитной подсистемы достаточно хорошо изучен в статических полях) в эксперименте с ССМП, скорость возрастания которого в генераторе МК-1 достигает $10^7 - 10^8$ Тл с^{-1} , позволили определить величину важного с методической точки зрения магнитокалорического эффекта. Показано, что температура при адиабатическом намагничивании в поле 75 Тл достигает 35 К и непредвиденного увеличения температуры в импульсных магнитных полях не происходит [23].

4. Изэнтропическое сжатие веществ давлением сверхсильного магнитного поля

Исследование поведения веществ, прежде всего их уравнений состояния (УРС), при сверхвысоких давлениях является одной из интереснейших задач физики высоких плотностей энергии [24, 25]. Особый интерес здесь представляет область низких температур, важная не только, например, для понимания строения и эволюции планет-гигантов, но и для проверки фундаментальных теоретических построений.

Для получения высоких и сверхвысоких давлений применяются два основных способа — статический и динамический, — взаимно дополняющих друг друга. В статике обычно реализуется режим изотермического сжатия при сравнительно невысоких температурах

($T < 1000$ К) [26]; в экспериментах по изучению УРС, статическое давление не превосходит 1,5 Мбар по причинам, связанным в основном с разрушением исследуемого образца. (Кроме того, возрастание давления ограничено прочностными характеристиками материала наковален.) С другой стороны, в динамическом ударно-волновом режиме температура может достигать нескольких десятков тысяч градусов, но при этом "холодное" давление не превышает и 0,5 Мбар (см., например, [27]). Ещё одним динамическим методом является изэнтропическое сжатие вещества в камере, на внешнюю поверхность которой действует однородное, плавно возрастающее внешнее давление [28]. Тепловая составляющая полного давления, в отличие от таковой в ударно-волновом методе, будет, как и в статическом методе, существенно меньше "холодной" части, и при низкой начальной температуре исследуемого вещества его изэнтропа будет близка к нулевой изотерме. В настоящее время в области *низких температур и сверхвысоких (мультимегабарных) давлений* лишь метод изэнтропического сжатия позволяет эффективно определять характеристики вещества. Для исследования свойств веществ в этой области во ВНИИЭФ применяется *изэнтропическое сжатие давлением сверхсильного магнитного поля* [29, 30]. Полученные этим методом экспериментальные результаты в основном связаны с построением нулевых изотерм изотопов водорода — протия и дейтерия. (Заметим, кстати, что во ВНИИЭФ были проведены одни из первых работ по исследованию водорода при сверхвысоких давлениях [31–33].)

Интерес к исследованиям термодинамических и кинетических свойств водорода не случаен — он вызван широким распространением водорода во Вселенной, а также его практической значимостью как одного из основных элементов энергетики будущего. Кроме того, предсказано наличие ряда необычных, экзотических свойств водорода: высокотемпературная сверхпроводимость его металлической фазы [34], максимум температуры на кривой плавления [35–37], существование двухкомпонентной сверхтекучей и сверхпроводящей жидкости [38].

Применяемый нами метод технически реализован в виде устройства сжатия, основными элементами которого являются: магнитокумулятивный генератор МК-1 [7], цилиндрическая камера сжатия [39], криогенное устройство [40] (рис. 5). Камера сжатия образована толстостенной медной обжимающей трубкой и массивными торцевыми заглушками. Под обжимающей трубкой коаксиально располагаются эталонный образец и исследуемый образец (в центре). Криоустройство, содержащее сосуд для хранения жидкого гелия и вакуумируемый криопровод, предназначено для предварительного охлаждения исследуемого газа до твёрдого состояния ($T_0 \approx 5$ К). Под действием созданного в криососуде избыточного давления хладагент поднимается вверх по криопроводу и постепенно охлаждает камеру сжатия вместе с её содержимым. Во время разряда мощной конденсаторной батареи на соленоид генератора в его полости, в зазоре между соленоидом и обжимающей трубкой, создаётся начальный магнитный поток. В процессе работы генератора МК-1 магнитное поле в зазоре усиливается до мегагауссовых значений, оказывая на внешнюю поверхность камеры сжатия однородное магнитное давление $B^2/8\pi$. В результате трубка камеры

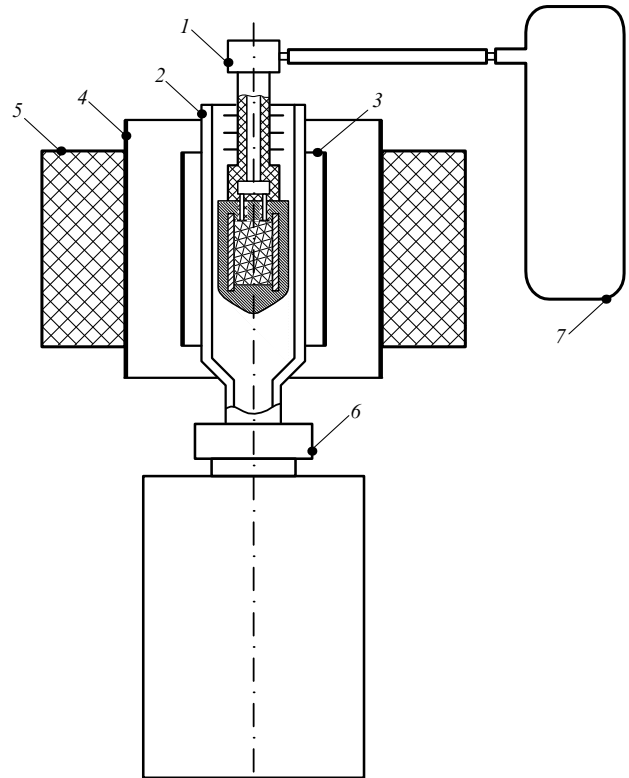


Рис. 5. Схема устройства сжатия: 1 — криоконтейнер с камерой сжатия, заполненной исследуемым веществом, 2 — криопровод, 3 — второй каскад генератора МК-1, 4 — соленоид начального поля генератора (первый каскад), 5 — кольцевой заряд взрывчатого вещества, 6 — сосуд для хранения жидкого гелия, 7 — ёмкость с исследуемым газом.

схлопывается без образования ударных волн и сжимает (в течение ≈ 15 мкс) находящиеся в ней вещества до мегабарных давлений.

Важную и существенную часть исследований составляет численное моделирование процессов, происходящих в устройстве сжатия, с помощью созданных во ВНИИЭФ пакетов прикладных программ [41–43]. Одной из основных целей моделирования является выбор такой геометрии камеры сжатия, таких её начальных размеров и начального поля МК-генератора, которые обеспечивали бы минимальные градиенты давления в рабочей зоне камеры сжатия. Результаты расчётов использовались также при разработке применяемой нами рентгенографической методики измерения размеров [44]. Наконец, расчёты используются и при анализе результатов экспериментов, что позволяет оценить градиентную поправку при определении давления в исследуемом образце.

Способ определения плотности ρ и давления P сжатого вещества заключается в следующем. При проведении эксперимента центральная часть экспериментального устройства просвечивается импульсом тормозного излучения бетатрона БИМ-234 [45, 46] с регистрацией изображения на рентгеновской плёнке. Рентгенографирование производится в тот момент, когда давление в камере сжатия достигает сверхвысоких значений. По результатам обработки изображений на рентгеновском снимке, полученных в эксперименте, определяются размеры, а следовательно, и сжатие как исследуемого, так и эталонного образцов. По известным значениям сжатия и

начальной плотности ρ_0 образца, легко определить его плотность в момент рентгенографирования. По плотности эталона с помощью его известной изэнтропии можно определить давление в эталоне, а после учёта небольших расчётных поправок — и в исследуемом веществе. В качестве эталона лучше всего подходит алюминий, для которого накоплен и обработан наиболее обширный и представительный статистический материал, охватывающий требуемый интервал давлений [47–53]. Для того чтобы по рентгеновскому снимку можно было определить размеры сжатых образцов с приемлемой точностью, на границах, отделяющих образцы друг от друга и от обжимающей трубки, должен располагаться тонкий слой высокоплотного материала. В нашем случае в качестве такого материала использовался сплав, содержащий 95 % вольфрама. Таким образом, проведя эксперимент с рентгенографированием, получаем для исследуемого вещества точку на плоскости $P-\rho$. Изменяя от эксперимента к эксперименту время рентгенографирования, получаем набор точек, соответствующий его "холодной" изэнтропе.

С применением описанных выше устройства сжатия и измерительной методики во ВНИИЭФ были проведены серии опытов [54, 55], конечной целью которых являлось построение нулевых изотерм для протия и дейтерия в интервале давлений 1–5 Мбар. Полученные для H_2 и D_2 экспериментальные точки (в координатах $P-\rho/\rho_0$) приведены на рис. 6. Сплошной линией представлена кривая, аппроксимирующая экспериментальные данные. Штриховой кривой показана экстраполяция в мегабарную область нулевой изотермы, построенной в опытах на алмазных наковальнях [56]. Приведена также аналогичная кривая (пунктирная), предложенная в [57] для молекулярной и атомарной фаз протия и дейтерия. Данные [54, 55] не указывают на какие-либо драматические отклонения в поведении исследуемых нулевых изотерм. Некоторая немонотонность в расположении точек на диаграмме при давлениях, превышающих 4 Мбар, возможно, связана с полиморфным превращением в решётке или даже с её плавлением давлением [35]. Видно, что точки [54, 55] в пределах погрешностей согласуются с нулевой изотермой [56], хотя при давлениях, больших 1 Мбар, лежат всё же несколько выше. Их расположению не противоречит и полуфеноменологическая изотерма [57], учитывающая результаты опытов [31–33] по квазиизэнтропическому сжатию газообразного (в начальном состоянии) протия¹ (рис. 6а). Но в соответствии с [57] в области давлений от 3 до 4 Мбар должен происходить переход кристалла из молекулярной фазы в атомарную со значительным ($\approx 14\%$) скачком плотности. (Согласно [56] давление перехода превосходит 6 Мбар, а скачок плотности будет в несколько раз меньшим.) Для прояснения хода нулевой изотермы в указанной области давлений требуется проведение дополнительных экспериментов при более высокой точности измерения размеров исследуемых образцов. Отметим также, что построенная в [55] по результатам

¹ Полученным в [31–33] состояниям исследуемого вещества соответствуют расчётные значения температур, превышающие 2000 К [33]. Проведённые недавно на алмазных наковальнях эксперименты [36, 37] указывают на существование разворота на кривой плавления протия вблизи $T = 1000$ К, поэтому результаты [31–33] относятся скорее не к "холодному" веществу, а к плотной разогретой материи.

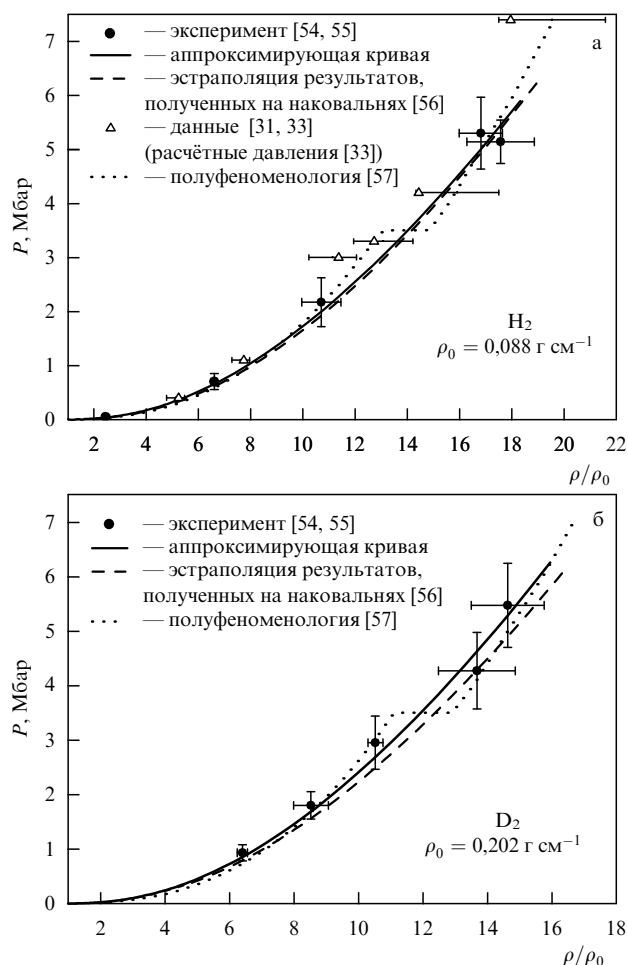


Рис. 6. Диаграммы "давление–сжатие" для протия (а) и дейтерия (б).

экспериментов кривая сжатия статической решётки протия и дейтерия находится в хорошем согласии с результатами первопринципных расчётов [58–62].

И наконец, следует особо подчеркнуть: изложенный выше способ исследований позволяет также строить кривые "холодного" сжатия прочих веществ, состоящих из элементов с малыми атомными номерами, таких, например, как гелий, литий, графит, вода, гидриды лёгких металлов и многих других.

5. Заключение

В результате многолетней работы предложенная А.Д. Сахаровым идея магнитной кумуляции энергии развита во ВНИИЭФ до уровня физического метода получения сверхсильных магнитных полей с глубоким пониманием физических процессов и закономерностей. Разработаны конструкции физических приборов — каскадных генераторов сверхсильных магнитных полей 10- и 20-мегагауссного диапазонов. Разработаны приёмы внедрения созданного метода в практику научных исследований, что позволило проводить систематические исследования в фундаментальных направлениях физики: физике твёрдого тела (оптические, магнитные, транспортные свойства веществ), физике экстремального состояния вещества (изэнтропическое сжатие давлением мегабарного диапазона). Результаты исследований составили существенную часть содержания регулярных международных мегагауссных конференций, две из кото-

рых — седьмая и девятая — были организованы и проведены силами сотрудников ВНИИЭФ [63, 64].

Список литературы

- Сахаров А Д и др. *ДАН СССР* **165** 65 (1965) [Sakharov A D *Sov. Phys. Dokl.* **10** 1045 (1966)]
- Сахаров А Д *УФН* **88** 725 (1966) [Sakharov A D *Sov. Phys. Usp.* **9** 294 (1966)]
- Павловский А И и др. *ПТЭ* (5) 195 (1979)
- Павловский А И и др. *Письма в ЖТФ* **9** 1360 (1983)
- Павловский А И и др. *Письма в ЖЭТФ* **38** 437 (1983) [Pavlovskii A I et al. *JETP Lett.* **38** 529 (1983)]
- Павловский А И и др., в сб. *Сверхсильные магнитные поля. Физика. Техника. Применение* (Под ред. В М Титова, Г А Швецова) (М.: Наука, 1984) с. 14
- Павловский А И и др., в сб. *Сверхсильные магнитные поля. Физика. Техника. Применение* (Под ред. В М Титова, Г А Швецова) (М.: Наука, 1984) с. 19
- Вуков А I et al. *Physica B* **216** 215 (1996)
- Долотенко М И и др., Патент 2065247 РФ; *Бюлл. изобрет.* (8) 107 (1996)
- Tatsenko O M, Selemir V D, in *Megagauss Magnetic Field Generation, its Application to Science and Ultra-High Pulsed-Power Technology: Proc. of the VIIIth Intern. Conf. on Megagauss Magnetic Field Generation and Related Topics* (Ed. H J Schneider-Muntau) (Hackensack, NJ: World Scientific, 2004) p. 207
- Selemir V D, Tatsenko O M, Platonov V V, in *Proc. of the X Intern. Conf. on Megagauss Magnetic Field Generation and Related Topics* (Ed. M von Ortenberg) (Berlin, 2004) p. 219
- Boyko B A et al., in *12th IEEE Intern. Pulsed Power Conf., Monterey, Calif., USA, 1999, Digest of Technical Papers* (Eds C Stallings, H Kirbie) (New York: IEEE, 1999) p. 746
- Звездин А К и др. *УФН* **168** 1141 (1998) [Zvezdin A K et al. *Phys. Usp.* **41** 1037 (1998)]
- Звездин А К и др. *УФН* **172** 1303 (2002) [Zvezdin A K et al. *Phys. Usp.* **45** 1183 (2002)]
- Pavlovskii A I et al. *Physica C* **162–164** 1659 (1989)
- Быков А И и др. *Сверхпроводимость: физика, химия, техника* **8** (1) 37 (1995)
- Puhlmann N et al. *Physica B* **294–295** 447 (2001)
- Gavrilenko V I, in *Proc. of the 14th Intern. Symp. "Nanostructures: Physics and Technology", St. Petersburg, Russia, 2006*, p. 166
- Кудасов Ю Б и др. *Письма в ЖЭТФ* **68** 326 (1998) [Kudasov Yu B et al. *JETP Lett.* **68** 350 (1998)]
- Zvezdin A K et al., in *Itinerant Electron Magnetism: Fluctuation Effects* (Eds D Wagner, W Brauneck, A Solontsov) (Dordrecht: Kluwer Acad. Publ., 1998) p. 285
- Kirste A et al. *Physica B* **336** 335 (2003)
- Kazei Z A et al. *Physica B* **346–347** 241 (2004)
- Левитин Р З и др. *ФТТ* **44** 2013 (2002) [Levitin R Z et al. *Phys. Solid State* **44** 2107 (2002)]
- Зельдович Я Б, Райзер Ю П *Физика ударных волн и высокотемпературных гидродинамических явлений* (М.: Наука, 1966) [Zel'dovich Ya B, Raizer Yu P *Physics of Shock Waves and High-Temperature Hydrodynamic Phenomena* (Mineola, NY: Dover Publ., 2002)]
- Фортов В Е *Экстремальные состояния вещества* (М.: Физматлит, 2009); Fortov V E *Extreme States of Matter on Earth and in the Universe* (Berlin: Springer, 2011)
- Jayaraman A *Rev. Mod. Phys.* **55** 65 (1983)
- Трунин Р Ф *ЖТФ* **76** (7) 90 (2006) [Trunin R F et al. *Tech. Phys.* **51** 907 (2006)]
- Godwal B K, Sikka S K, Chidambaram R *Phys. Rep.* **102** 121 (1983)
- Pavlovskii A I et al., in *Megagauss Physics and Technology* (Ed. P J Turchi) (New York: Plenum Press, 1980) p. 627
- Pavlovskii A I et al., in *Megagauss Technology and Pulsed Power Applications. Proc. of the Fourth Intern. Conf. on Megagauss Magnetic Field Generation and Related Topics* (Eds C M Fowler, R S Caird, D J Erickson) (New York: Plenum Press, 1987) p. 255
- Григорьев Ф В и др. *Письма в ЖЭТФ* **16** 286 (1972) [Grigor'ev F V et al. *JETP Lett.* **16** 201 (1972)]
- Григорьев Ф В и др. *ЖЭТФ* **69** 743 (1975) [Grigor'ev F V et al. *Sov. Phys. JETP* **42** 378 (1975)]
- Григорьев Ф В и др. *ЖЭТФ* **75** 1683 (1978) [Grigor'ev F V et al. *Sov. Phys. JETP* **48** 847 (1978)]
- Ashcroft N W *Phys. Rev. Lett.* **21** 1748 (1968)
- Bonev S A et al. *Nature* **431** 669 (2004)
- Deemyad S, Silvera I F *Phys. Rev. Lett.* **100** 155701 (2008)
- Eremets M I, Troyan I A *Письма в ЖЭТФ* **89** 198 (2009) [*JETP Lett.* **89** 174 (2009)]
- Babaev E, Suddø A, Ashcroft N W *Phys. Rev. Lett.* **95** 105301 (2005)
- Boriskov G V et al., in "Megagauss-XI", *Proc. of the Eleventh Intern. Conf. on Megagauss Magnetic Field Generation and Related Topics* (Eds Ivor Smith, Bucur Novac) (London, 2007) p. 269
- Boriskov G V et al., in *Proc. of 2006 Intern. Conf. on Megagauss Magnetic Field Generation and Related Topics* (Eds G F Kiuttu, R E Reinovsky, P J Turchi) (Piscataway, NJ: IEEE, 2007) p. 465
- Борисков Г В, Тимарёва В И, в сб. *VIII Харитоновские чтения по проблемам физики высоких плотностей энергии* (Саров: ФГУП "РФЯЦ – ВНИИЭФ", 2006) с. 516
- Борисков Г В, Тимарёва В И, в сб. *VIII Харитоновские чтения по проблемам физики высоких плотностей энергии* (Саров: ФГУП "РФЯЦ – ВНИИЭФ", 2006) с. 509
- Борисков Г В, Тимарёва В И, Соколов С С, в сб. *X Харитоновские чтения по проблемам физики высоких плотностей энергии, Саров, 11–14 марта, 2008*, с. 285
- Pavlov V N et al., in *XII Intern. Conf. on Megagauss Magnetic Field Generation and Related Topics. Abstracts* (Ed. G A Shvetsov) (Novosibirsk: Lavrentyev Institute of Hydrodynamics, 2008) p. 123
- Павловский А И и др. *ДАН СССР* **160** 68 (1965) [Pavlovskii A I et al. *Sov. Phys. Dokl.* **10** 30 (1965)]
- Kuropatkin Yu P et al., in *11th IEEE Pulsed Power Conf. Digest of Technical Papers* (Eds G Cooperstein, I Vitkovitsky) (Piscataway, NJ: IEEE, 1997) p. 1663
- Альтшулер Л В и др. *ЖЭТФ* **38** 790 (1960) [Al'tshuler L V et al. *Sov. Phys. JETP* **11** 573 (1960)]
- Симоненко В А и др. *ЖЭТФ* **88** 1452 (1985) [Simonenko V A et al. *Sov. Phys. JETP* **61** 869 (1985)]
- Альтшулер Л В, Брусникин С Е, Кузьменков Е А *ПМТФ* (1) 134 (1987) [Al'tshuler L V, Brusnikin S E, Kuz'menkov E A *J. Appl. Mech. Tech. Phys.* **28** 129 (1987)]
- Nellis W J et al. *Phys. Rev. Lett.* **60** 1414 (1988)
- Greene R G, Luo H, Ruoff A L *Phys. Rev. Lett.* **73** 2075 (1994)
- Калиткин Н Н, Кузьмина Л В, в сб. *Ударные волны и экстремальные состояния вещества* (Под ред. В Е Фортова, Л В Альтшулера, Р Ф Трунина, А И Фунтикова) (М.: Наука, 2000) с. 107
- Трунин Р Ф и др., в сб. *Экспериментальные данные по ударно-волновому сжатию и адиабатическому расширению конденсированных веществ* (Под ред. Р Ф Трунина) (Саров: РФЯЦ – ВНИИЭФ, 2006) с. 24
- Boriskov G V et al. *J. Phys. Conf. Ser.* **121** 072001 (2008)
- Boriskov G V et al. *Contrib. Plasma Phys.*, DOI 10.1002/ctpp.201010106 (2010)
- Loubeyre P et al. *Nature* **383** 702 (1996)
- Копышев В П, Урлин В Д, в сб. *Ударные волны и экстремальные состояния вещества* (Под ред. В Е Фортова, Л В Альтшулера, Р Ф Трунина, А И Фунтикова) (М.: Наука, 2000) с. 297
- Varbee T W (III), Cohen M L, Martins J L *Phys. Rev. Lett.* **62** 1150 (1989)
- Kaxiras E, Guo Z *Phys. Rev. B* **49** 11822 (1994)
- Natoli V, Martin R M, Ceperley D M *Phys. Rev. Lett.* **70** 1952 (1993)
- Natoli V, Martin R M, Ceperley D M *Phys. Rev. Lett.* **74** 1601 (1995)
- Pierleoni C, Ceperley D M, Holzmann M *Phys. Rev. Lett.* **93** 146402 (2004)
- Megagauss and Megaampere Pulse Technology and Applications* (Eds V K Chernyshev, V D Selemir, L N Plyashkevich) (Sarov: VNIIEF, 1997)
- Megagauss-9* (Eds V D Selemir, L N Plyashkevich) (Sarov: VNIIEF, 2004)