

КОНФЕРЕНЦИИ И СИМПОЗИУМЫ

Научная сессия Отделения физических наук Российской академии наук

(19 декабря 2005 г.)

19 декабря 2005 г. в конференц-зале Физического института им. П.Н. Лебедева РАН состоялась Научная сессия Отделения физических наук Российской академии наук. На сессии были заслушаны доклады:

1. **Крохин О.Н.** (Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН, Москва). *Передача электрической энергии посредством лазерного излучения.*

2. **Забродский А.Г.** (Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН, Санкт-Петербург). *Физика, микро- и нанотехнологии портативных топливных элементов.*

3. **Аврорин Е.Н., Симоненко В.А., Шибаршов Л.И.** (Российский федеральный ядерный центр "Всероссийский научно-исследовательский институт технической физики им. Е.Н. Забабахина", г. Снежинск, Челябинская область). *Физические исследования при ядерных взрывах.*

4. **Преображенский В.Л.** (Научный центр волновых исследований Института общей физики им. А.М. Прохорова РАН, Объединенная европейская лаборатория нелинейной акустики конденсированных сред (ЛЕМАС)). *Нелинейная акустика ультразвуковых волн с обращенным фронтом.*

Краткое содержание первых трех докладов публикуется ниже. Доклад В.Л. Преображенского близок по содержанию к его сообщению на сессии ОФН РАН 28 сентября 2005 г., краткое содержание которого опубликовано в № 1 УФН за этот год в разделе "Конференции и симпозиумы".

PACS numbers: 42.60.-v, 42.79.Gn, 42.40.+w

Передача электрической энергии посредством лазерного излучения

О.Н. Крохин

В докладе рассматривается возможность построения линии передачи электрической энергии посредством ее преобразования в лазерное излучение, которое впоследствии снова преобразуется в электрический ток на полупроводниковой структуре, аналогичной структуре полупроводникового лазера. Передача энергии осуществляется по оптическому волокну.

Особенностью рассматриваемой схемы является монохроматичность преобразуемого в электрический

ток излучения и, что принципиально важно, пространственная когерентность этого излучения. Потери электрической энергии в такой линии передачи могут составить заметную величину, но уже сейчас при использовании полупроводниковых структур в качестве элементов-преобразователей можно говорить о величине не более 50 % для небольших расстояний.

В работе Н.Г. Басова и автора этого доклада было обращено внимание на возможность возникновения электродвижущей силы (ЭДС) внутри полупроводника (подобного арсениду галлия, применяемого для создания диодных лазеров), который имеет структуру зон, допускающих прямой оптический переход при облучении его монохроматическим излучением большой мощности [1]. Энергия квантов этого излучения должна быть близка к краю поглощения ($\hbar\omega \geq \Delta$, где Δ — ширина запрещенной зоны), когда коэффициент поглощения невелик, в противном случае полупроводник будет разрушен тепловым ударом при больших подаваемых потоках излучения. Электродвижущая сила возникает вследствие того, что при поглощении светового потока концентрации электронов и дырок возрастают, возникает сильнонеравновесное состояние, которое может быть описано посредством введения понятия квазиуровней Ферми для электронов μ_c в зоне проводимости и μ_v в валентной зоне, и величина ЭДС определяется выражением $(\mu_c - \mu_v)/e$ (e — заряд электрона).

В пределе очень больших плотностей потока падающего излучения разность квазиуровней Ферми будет стремиться к значению энергии кванта $\hbar\omega$. Это состояние называется эффектом насыщения поглощения и является хорошо известным в квантовой электронике.

Помимо монохроматичности падающее излучение должно иметь хорошую пространственную когерентность, в противном случае его невозможно сконцентрировать на малом входном окне полупроводниковой структуры, иначе говоря, это излучение должно иметь лазерное происхождение. Подача такого излучения осуществляется посредством сопряженного с лазерным источником и структурой, преобразующей энергию света в электричество, оптического волновода — оптоволокну. Лазер, преобразующая структура и оптоволокну образуют единую оптическую систему — составной резонатор.

Эффект насыщения возникает, как известно, в том случае, когда вероятность оптических переходов (вероятность поглощения и вероятность индуцирован-

ного излучения) значительно превышает вероятность релаксации в рассматриваемой квантовой системе (две группы нижних и верхних квантовых уровней). При этом плотность поглощаемой мощности асимптотически стремится к величине энергии, уводимой в релаксационный канал из единицы объема в единицу времени. Для полупроводника, находящегося в мощном монохроматическом поле, эффект насыщения, как сказано выше, сводится к асимптотическому приближению разности квазиуровней Ферми электронов в зоне проводимости и валентной зоне к значению энергии кванта. При этом коэффициент поглощения, естественно, стремится к нулю. Конечно, все это относится к переходам вблизи края поглощения, т.е. при $\hbar\omega \geq \Delta$, поскольку при $\hbar\omega$, заметно превышающей Δ , подходить к насыщению невозможно из-за резкого роста плотности электронных состояний и, следовательно, резкого возрастания плотности мощности, уходящей через релаксационный канал. В этом, в частности, заключается отличие рассматриваемой схемы преобразования энергии от фотоэлектрических преобразователей (солнечных батарей), в которых преобразуемые плотности мощности световой энергии малы. По существу, то, что рассматривается в данном докладе, представляет собой схему близкую к полупроводниковому лазеру, работающему в обратном направлении: "свет — в электрический ток".

Другой существенной особенностью рассматриваемой схемы является использование в качестве линии передачи энергии оптоволоконна, которое в идеальном случае сохраняет качество пространственной когерентности передаваемой электромагнитной волны. Другими словами, если на одном конце оптоволоконной линии полупроводниковым лазером генерируется излучение, то на другом конце оно имеет такую же яркость и может быть введено в аналогичную по своим геометрическим размерам полупроводниковую структуру, преобразующую световую энергию в электрическую, — "преобразователь" (рис. 1). Таким образом, вся система представляет собой длинный резонатор, в котором реализуются определенные световые моды. При этом для увеличения эффективной длины поглощения излучения в преобразователе задняя поверхность полупроводниковой структуры может быть сделана полностью отражающей. Можно также применить для этой цели ряд последовательно расположенных электрически развязанных секций, которые могут обеспечить полное поглощение приходящего в структуру излучения, или использовать многопроходную схему.

Рассмотрим принцип работы преобразователя монохроматического излучения в электрический ток. На рисунке 2 представлена схема устройства. Излучение из световода подводится к узкой области образца, имеющей собственную проводимость (i-тип) и расположенной



Рис. 1. Схема линии передачи энергии.

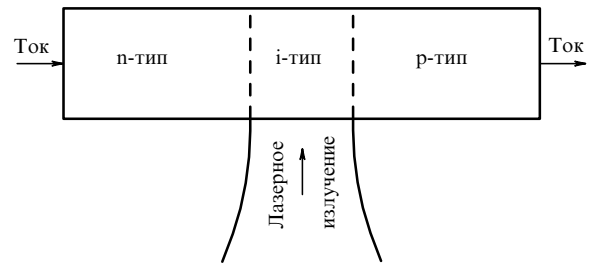


Рис. 2. Принципиальная схема устройства преобразователя света в ток.

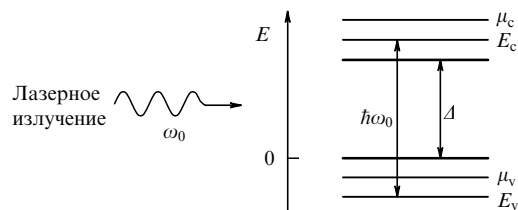


Рис. 3. Схема электронных уровней полупроводника. Показаны оптические прямые переходы электронов между зоной проводимости и валентной зоной и положения квазиуровней Ферми в этих зонах.

между слоями с электронной и дырочной проводимостями. Предполагается, что оптический переход является прямым, т.е. происходит практически без изменения импульса электрона в валентной зоне и зоне проводимости. На рисунке 3 представлена энергетическая схема квантовых уровней и оптический переход в преобразователе. Подразумевается, что в преобразователе должны использоваться полупроводниковые материалы и при его изготовлении могут быть использованы технологические приемы, аналогичные применяемым при изготовлении полупроводниковых лазеров.

При облучении полупроводника монохроматическим полем возникают оптические переходы из валентной зоны в зону проводимости с поглощением кванта и в обратном направлении с его индуцированным излучением. Если интенсивность падающего излучения мала, то релаксация (радиационные спонтанные и безызлучательные переходы) поддерживает тепловое равновесие и поглощение превалирует над индуцированным излучением, следовательно, валентная зона будет почти целиком заполнена (если легирование донорными и акцепторными примесями не очень сильное). При увеличении интенсивности излучения будет возрастать населенность уровней зоны проводимости (равная функции распределения $f_c(E_c)$, где E_c — энергия уровня в зоне проводимости) и будет уменьшаться населенность уровней в валентной зоне, описываемая $f_v(E_v)$, где E_v — энергия уровня в валентной зоне. Таким образом, для коэффициента поглощения $k(\omega_0)$ можно написать:

$$k(\omega_0) = \alpha(\omega_0) [f_v(E_v) - f_c(E_c)], \quad (1)$$

где ω_0 — частота падающего излучения, $E_c - E_v = \hbar\omega_0 \geq \Delta$, $\alpha(\omega_0)$ — коэффициент поглощения при малых интенсивностях и низкой температуре, когда равновесная концентрация носителей невелика и не зависит от интенсивности излучения, т.е. $f_c \sim 0$, $f_v \sim 1$.

Для прямых переходов

$$\alpha \sim (\hbar\omega_0 - \Delta)^{1/2}. \tag{2}$$

Для достаточно сильно легированных полупроводников

$$\alpha \sim \exp [\gamma(\hbar\omega_0 - \Delta)], \tag{3}$$

где γ — параметр, т.е. $\alpha(\omega_0)$ вблизи края поглощения, $\hbar\omega_0 \geq \Delta$, пропорционален плотности электронных состояний.

С увеличением интенсивности квазиуровни Ферми электронов зон начинают смещаться в соответствующие зоны, что проявляется в возникновении неравновесных электронов в зоне проводимости и вакантных мест (дырок) в валентной зоне, и при очень больших интенсивностях, когда скорость релаксационных процессов относительно мала, разность квазиуровней Ферми в зоне проводимости μ_c и валентной зоне μ_v асимптотически стремится к $\hbar\omega_0$:

$$\mu_c - \mu_v \rightarrow \hbar\omega_0.$$

Подставив в (1) выражение для функции распределения Ферми

$$f(E) = \frac{1}{\exp [(E - \mu)/T] + 1}, \tag{4}$$

выражение (1) можно переписать в виде (рис. 4)

$$k(\omega_0) = \alpha(\omega_0) \frac{1}{\exp [(E_v - \mu_v)/T]} \times \left\{ 1 - \frac{1}{\exp [(\hbar\omega_0 - \mu_c + \mu_v)/T]} \right\}, \tag{5}$$

откуда видно, что $k(\omega_0) \rightarrow 0$ при $\mu_c - \mu_v \rightarrow \hbar\omega_0$.

Число квантов приходящего излучения, поглощенное в единице объема в единицу времени, равно

$$-\frac{dI}{dx} = k(\omega_0) I,$$

где I — поток квантов, отнесенный к единице поверхности (интенсивность). Из соотношения (5) видно, что эффект насыщения поглощения становится заметным, когда $\hbar\omega_0 - \mu_c + \mu_v \leq T$. Это обстоятельство позволяет разложить выражение в правой части (5) по малой величине $(\hbar\omega_0 - \mu_c + \mu_v)/T$ и получить очень приближенно:

$$k(\omega_0) = \alpha(\omega_0) \frac{\hbar\omega_0 - \mu_c + \mu_v}{T} \frac{1}{\exp [(E_v - \mu_v)/T]}, \tag{6}$$

где последний множитель в правой части возникает из-за неравенства эффективных масс электронов в зоне проводимости и валентной зоне (эффективные массы электронов и дырок).

Величина $f_v(E_v) - f_c(E_c)$ может быть определена в стационарном случае из условия равенства скорости поглощения $|k|I$ и скорости рекомбинации электронов и дырок, т.е. релаксации, отнесенных к единице объема $R(n, p)$, которая при больших уровнях неравновесных концентраций электронов n и дырок p пропорциональна их произведению,

$$|k|I = R. \tag{7}$$

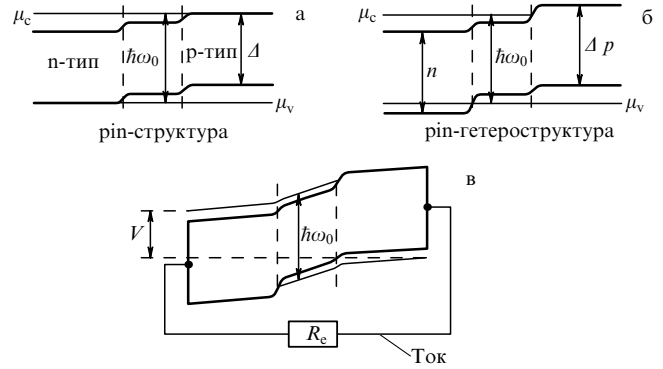


Рис. 4. Энергетическая структура полупроводникового преобразователя: (а, б) "холостой" режим, (в) режим под нагрузкой R_c , V — электрическое напряжение, pin-структура — последовательное расположение р-области, нелегированной i-области и n-области.

Если для коэффициента поглощения использовать упрощенное выражение (6), то (7) можно переписать в виде

$$\hbar\omega_0 - \mu_c + \mu_v \approx \frac{TR}{\alpha(\omega_0)I} \exp \left(\frac{E_v - \mu_v}{T} \right), \tag{8}$$

откуда следует, что разность $\mu_c - \mu_v$ стремится к $\hbar\omega_0$ при больших интенсивностях.

Таким образом, в области поглощения возникает электродвижущая сила. Для того, чтобы реализовать ее в виде электрического тока, необходимо, чтобы электроны и дырки двигались в разные стороны, что можно осуществить, присоединив к поглощенному объему по разные стороны полупроводники с n- и р-типом проводимости, имеющие высокий уровень легирования. Тогда электроны при подключении нагрузки под действием поля в активной области будут дрейфовать в n-область, а дырки — в р-область (см. рис. 4).

Для того чтобы уменьшить потери за счет ухода электронов в n-область, а дырок в р-область, можно применить гетероструктуру, которая создает дополнительные барьеры соответственно для электронов и дырок. В этом случае возникающий электрический ток "нагружает" объем, в котором происходит генерация электронно-дырочных пар и формула (7) может быть переписана в виде

$$kI = R + \frac{J}{de}, \tag{9}$$

где J — плотность электрического тока, d — толщина слоя, в котором происходит генерация электронно-дырочных пар.

Параметры такой линии передачи электрической энергии можно оценить, используя аналогию с разработанными в последнее время устройствами и элементами — полупроводниковыми лазерами и оптическими волокнами. Полупроводниковые лазеры дают возможность в единичном приборе получить мощность более 10 Вт при весьма высоком КПД, порядка 70 % [2]. Излучающее окно такого лазера имеет размеры 1×100 мкм, т.е. плотность мощности достигает 10 МВт см⁻². Это очень большая величина. В солнечных батареях преобразуется плотность мощности света менее 1 Вт см⁻². Поскольку преобразователь световой энергии в электрический ток по своему устройству и технологическому исполнению близок к полупро-

водниковому лазеру и, по существу, представляет собой лазер, работающий в обратном направлении, то можно в дальнейшем рассчитывать на такие же высокие коэффициенты преобразования. Современные оптические волокна способны пропускать значительные световые потоки, более 100 Вт, и имеют очень небольшие коэффициенты затухания, порядка $0,1 \text{ Дб м}^{-1}$ [3].

Таким образом, предложенная схема дает возможность передавать электрическую энергию на небольшие расстояния с коэффициентом передачи 50 %. Надо заметить, что здесь речь идет о низковольтной линии передачи с напряжением порядка ширины запрещенной зоны полупроводника. Отличие рассматриваемого варианта преобразователя от широко применяемого фотоэлектрического элемента, имеющего весьма высокий КПД, заключается в использовании пространственной когерентности генерируемого лазером излучения, что дает возможность реализовать на входе в преобразователь высокую концентрацию мощности и, таким образом, размеры преобразователя оказываются малыми по сравнению с размерами обычных фотоэлектрических элементов.

По-видимому, можно попытаться сделать преобразователь в виде слоистой структуры, в которой излучение проходит последовательно через несколько слоев, постепенно поглощаясь, а электрическую связь между слоями следует осуществлять по последовательной схеме. Тогда такой преобразователь на выходе даст более высокое напряжение.

В заключение следует отметить, что рассмотренный здесь способ передачи электрической энергии может оказаться полезным в низковольтных линиях или в других случаях, когда существуют нежелательные посторонние электрические помехи в передающих линиях или устройствах коммутации цепей. Кроме того, их можно использовать, когда невозможно применение металлических проводников (например в высоковольтных устройствах), а также когда важно уменьшить весовые характеристики линий питания.

Список литературы

1. Басов Н Г, Крохин О Н *ФТТ* **5** 2384 (1963)
2. Bugge F et al. *Appl. Phys. Lett.* **79** 1965 (2001); Pikhtin N A et al. *Electron. Lett.* **40** 1413 (2004)
3. Broderick N G R et al. *Opt. Fiber Technol.* **5** 185 (1999)

PACS numbers: **82.40.** – h, **82.45.** Yz, **82.47.** – a

Физика, микро- и нанотехнологии портативных топливных элементов

А.Г. Забродский

1. Введение

В докладе представлен краткий обзор результатов исследований, ведущихся на базе Физико-технического института им. А.Ф. Иоффе (ФТИ) и ряда других институтов РАН в области одного из направлений водородной энергетики, связанного с разработкой портативных топливных элементов (ТЭ).

Собственно, для ленинградского Физтеха проведение работ в области энергетики является традиционным.

Именно здесь А. Ф. Иоффе была создана отечественная школа в области термоэлектричества, начато его практическое использование для целей охлаждения. Здесь в 1930-е годы в лаборатории И. В. Курчатова при поддержке Иоффе разворачиваются ядерные исследования, в ходе которых молодые Г. Н. Флеров и К. А. Петржак открывают спонтанное деление ядер урана. С началом войны Г. Н. Флеров оказывается в школе авиационных техников и оттуда пишет свое известное письмо И. В. Сталину о необходимости безотлагательного начала работ над атомной бомбой, с которого началась история советского атомного проекта и ядерной энергетики, в которую много славных страниц было вписано физтеховцами. Именно в ФТИ под руководством В. Н. Тучкевича зародилось новое направление — силовая полупроводниковая электроника. Из развитого в ФТИ магистрального направления в физике, технологии и технике, связанного с именем Ж.И. Алферова и деятельностью созданной им научной школы в области полупроводниковых гетероструктур, можно выделить высокоэффективную солнечную энергетику на полупроводниковых гетероструктурах. Около полувека ФТИ активно участвует в программах физических исследований, создания и развития техники управляемого термоядерного синтеза на основе токамаков и в работах по диагностике горячей плазмы, а несколько лет назад были начаты физические исследования на созданной в Физтехе принципиально новой установке — сферическом токамаке "Глобус-М".

Сравнительно недавно ФТИ активно включился в работы по водородной энергетике в рамках программы совместных исследований РАН и ОАО ГМК "Норильский никель" (впоследствии — Национальная инновационная компания "Новые энергетические проекты"). Здесь мы будем говорить только о работах, связанных с разработкой новых типов портативных ТЭ. Представленный ниже материал иллюстрирует традиционный для ФТИ путь: от научных исследований — к базовым технологиям и далее, к разработке новой техники. В качестве "базовых технологий" в данном случае выступают технологии нанесения монослоев нанокатализаторов (раздел 3), а также кремниевые микро- и нанотехнологии (раздел 4), используемые для разработки портативных ТЭ (раздел 5). Обсуждается также возможный путь увеличения эффективности и удельной мощности ТЭ (раздел 5). Минимально необходимые сведения по водородной энергетике и ТЭ приведены в разделе 2.

2. Водородная энергетика и топливные элементы

Интерес к водородной энергетике стимулируется постепенным истощением запасов ископаемых видов топлива¹ и экологическими проблемами, а также

¹ Заметим, что наши представления об истощении запасов нефти формируются в основном из динамики роста цен на нефть и бензин. Эти цены сильно зависят от инфляции мировой валюты и политической стабильности в основных регионах нефтедобычи. Резкий взлет цен сопровождается революционными событиями и войнами в этих регионах. Абсолютный же рекорд цены нефти с учетом инфляции приходится вовсе не на настоящее время, а на период революции в Иране на рубеже 1970–1980-х годов. Тем не менее факт значительного истощения природных запасов топлива, в первую очередь нефти, действительно имеет место и беспокоит правительства стран-импортеров.

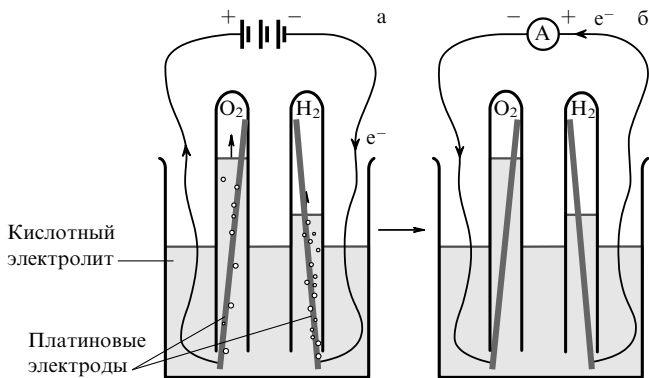


Рис. 1. Электрохимическая ячейка в режиме электролиза (а) и ТЭ (б).

необходимостью повышения эффективности преобразования энергии.

Привлекательность водорода как энергоносителя обусловлена, с одной стороны, многообразием источников его получения, к числу которых относятся уголь, природный газ, биомасса, солнечная, тепловая и фотоэлектрическая энергетика, гидроэнергетика, энергия ветра, ядерная электроэнергетика (последние четыре — через электролиз) и ядерная теплоэнергетика. С другой стороны, достоинства водорода наиболее полно проявляются при использовании его как энергоносителя в ключевых устройствах водородной энергетика — топливных элементах различного назначения, перекрывающих широкий диапазон мощностей: от нескольких мегаватт до нескольких десятков милливатт.

Первый ТЭ был разработан В. Р. Гроувом в 1839 г. на основе электрохимической ячейки с платиновыми электродами (рис. 1 [1]). При подключении внешнего источника тока эта ячейка могла работать в режиме электролиза. При замыкании же внешней цепи по ней шел ток и она работала в режиме ТЭ.

Гроув также первым установил, что эффективность работы ТЭ определяется "узким" местом — границей трех фаз (газообразное топливо, электролит, электрод), потратил много усилий на поиск эффективных электролитов и электродов, понял важность водорода как альтернативы дровам и углю.

Схема работы планарного ТЭ вместе с основными электрохимическими реакциями в анодных и катодных частях показана на рис. 2. Скорость реакций, как выяснилось, растет при увеличении температуры и эффективной поверхности электродов, а также при использовании катализатора (не показан на рис. 2 —

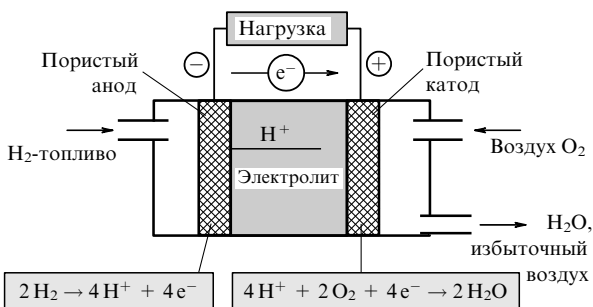


Рис. 2. Схема работы ТЭ.

обычно его располагают у поверхности электрод – электролит, см. рис. 6). Заметим, что в настоящее время широкое применение в ТЭ получили твердые электролиты: ТЭ с твердополимерной мембраной и твердооксидные ТЭ. Основное требование к таким электролитам — высокая протонная или ионная проводимость наряду с низкой электронной.

К достоинствам ТЭ относят:

а) потенциально высокий КПД, так при комнатной температуре

$$\text{КПД}_{\max} = \frac{\Delta G}{\Delta H} = 91\%, \quad \text{H}_2 + \frac{1}{2} \text{O}_2 \rightarrow \text{H}_2\text{O},$$

$$\Delta H = -242 \text{ кДж моль}^{-1}$$

(процесс сгорания: энтальпия образования $U + pV$),

$$\Delta G = -220 \text{ кДж моль}^{-1}$$

(полученная электрическая энергия — энергия Гиббса $U - TS$);

б) возможность использования высокоэнергоемкого топлива (водород, углеводороды, с удельной энергоемкостью в десятки раз выше, чем у Li-ионных батарей);

в) экологичность;

г) отсутствие движущихся частей и бесшумность (для портативных ТЭ).

Важно, что помимо водорода ТЭ может использовать и другие газообразные (биогаз, природный газ и другие) или жидкие (метанол, этанол и прочее) виды топлива. С точки зрения сфер применения ТЭ часто делят на три больших группы: стационарные, для транспорта, а также для бытовой техники и электроники.

В таблице приводятся для ориентира характерные параметры относящихся к последней группе так называемых портативных ТЭ, важными сферами приложения которых является питание мобильных телефонов и ноутбуков. Понятно, что интерес рынка к портативным ТЭ обусловлен быстро возрастающим объемом продаж малогабаритной электронной техники. Нас далее будут интересовать наиболее компактные и миниатюрные портативные ТЭ. Обычно в таких ТЭ в качестве электролита используют твердополимерную мембрану. Электроды разрабатывают на основе пористых углеродных или кремниевых материалов. Вот, кратко, и вся исходная информация, имевшаяся в распоряжении к началу наших исследований. Наш подход состоял в использовании развитых технологий микроэлектроники и микроэлектромеханики для изготовления пористых кремниевых электродных структур, а также в применении разработанной в ФТИ технологии получения монодисперсных наноматериалов методом лазерной электродисперсии для нанесения каталитических покрытий. Решались также задачи изготовления водородосепарирующей

Таблица

Сферы применения	Мобильные телефоны	Ноутбуки
Габариты, см	2–5	5–20
Мощность, Вт	~ 0,1	10–20
Энергоемкость, Вт ч	1–5	40–150
Основные типы	Метанольный, воздушно-водородный	Метанольный, воздушно-водородный

мембраны на основе кремния и "расширения" зоны реакции с помощью разрабатываемого материала со смешанной электронно-протонной проводимостью.

3. Технология нанесения монодисперсных нанокатализаторов

Большой расход платины в катализаторах современных ТЭ (примерно 1 г кВт^{-1}), как известно, рано или поздно ограничит возможности развития водородной энергетики. Поэтому чрезвычайно важно ставить и решать задачу разработки высокоэффективного катализатора с небольшим расходом платины.

С этой целью в наших работах использовался метод лазерной абляции [2], сопровождающейся процессом самоорганизующегося деления каплей мишени, схема которого иллюстрируется на рис. 3.

Параметры лазерного пучка ($1,06 \text{ мкм}$, 1 гВт см^{-2} , 25 нс) выбирались так, чтобы инициировать процесс каскадного деления каплей субмикронного размера, выплескиваемых из мишени. Неоднородное электрическое поле ($\sim 1 \text{ кВ см}^{-1}$) собирает наночастицы на подложку и сепарирует их.

Физическая основа метода — рэлеевская неустойчивость заряженных каплей в плазме, которая приводит к их каскадному делению. Соответствующая задача рассмотрена, например в [3]. Изначально стабильная сферическая капля радиусом R становится неустойчивой относительно процесса деления, если приобретаемый ею в плазме заряд Q превосходит критическую величину Q_{cr} , определяемую соотношением

$$Q > Q_{\text{cr}} = 8\pi(\epsilon_0 \alpha R^3)^{1/2}, \quad (1)$$

где α — коэффициент поверхностного натяжения жидкости.

Выполненные в ФТИ опыты показали, что интуитивное представление о делении капли на две соизмеримые части не соответствует действительности: одна из дочерних каплей оказывается много меньше другой, что ускоряет процесс их измельчения. Именно такая схема деления показана на рис. 4а. Ее экспериментальное подтверждение было получено при осаждении каплей на подложку, располагаемую вблизи мишени. Этой геометрии опыта соответствует рис. 4б, где на некоторых из материнских каплей ясно видны зародыши маленьких дочерних каплей.

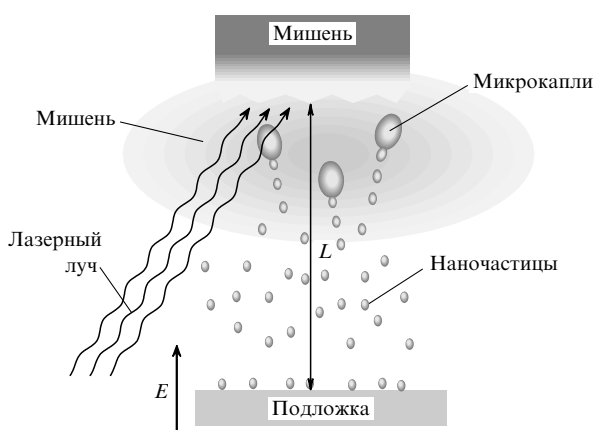


Рис. 3. Схема метода получения монодисперсного нанокатализатора.

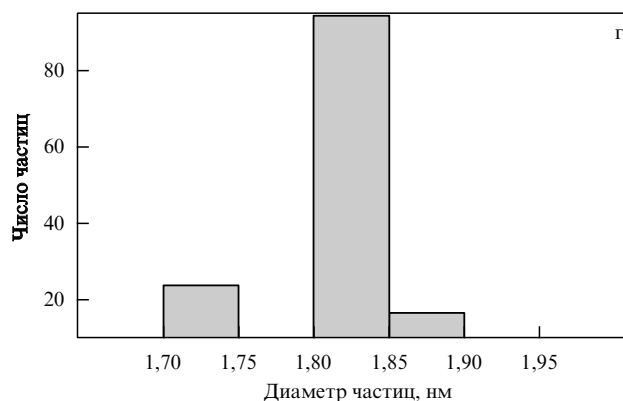
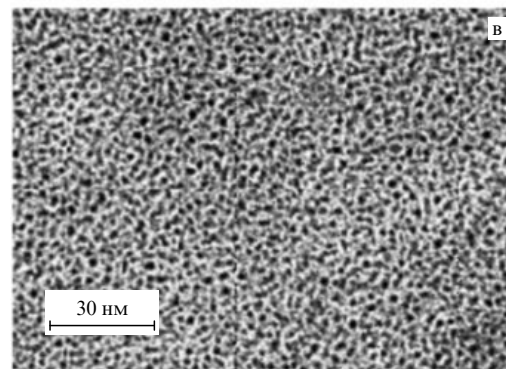
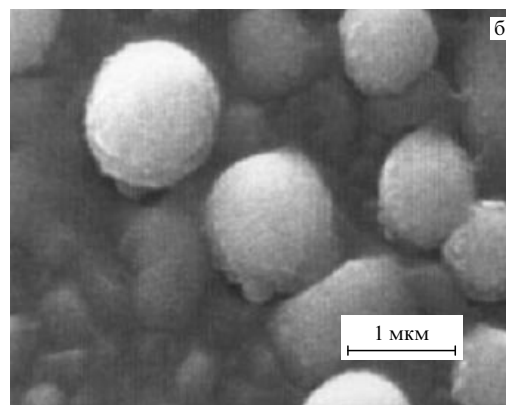
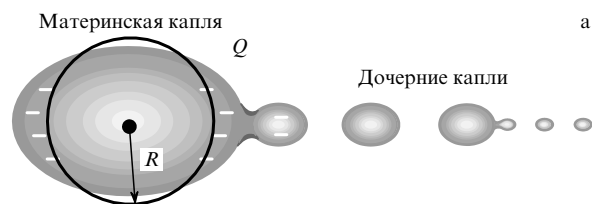


Рис. 4. (а) Процесс деления заряженных каплей в плазме. (б) Материнские капли на подложке, установленной вблизи мишени ($L = 0,5 \text{ см}$). (в) Распределение наночастиц по поверхности подложки, установленной вдали от мишени ($L = 5 \text{ см}$). (г) Распределение наночастиц по размерам.

Если электронная температура плазмы лазерного факела превышает 30 эВ , то капли всех размеров оказываются неустойчивыми относительно процесса деления. Это иллюстрируется на рис. 4а.

Тем не менее процесс каскадного деления все же останавливается из-за резкого возрастания эмиссии электронов из каплей и их быстрого разряда при уменьшении размера d дочерних каплей до некоторой мини-

мальной величины. Как можно показать [4],

$$d_{\min} \approx 8 \times 10^{-7} \varepsilon \alpha^{-3}, \quad (2)$$

где ε — работа выхода.

В частности, для платины d_{\min} составляет порядка 2 нм (рис. 4в) при минимальной дисперсии диаметра частиц (рис. 4г). Весьма важно, что именно этот размер оказывается оптимальным для эффективной работы каталитических покрытий.

Так, получаемые с помощью разработанного метода наночастицы платины в большинстве имеют один и тот же размер $d = 1,8$ нм. Вследствие высокой скорости охлаждения ($dT/dt > 10^7$ К с⁻¹) они аморфны и не коагулируют. Разработанная технология позволяет наносить на узлы ТЭ строго дозированно слои (и части слоев) монодисперсных частиц высокоактивного катализатора (не только платины) размером 2–3 нм и тем самым существенно уменьшить расход металлов платиновой группы, примерно до 0,1 г кВт⁻¹.

4. Создание электродных структур из макропористого кремния. Формирование электродов с 10-нанометровой мембраной для очистки водорода

Использование технологий получения пористого кремния² позволяет решать проблему перехода к микро- и нанотехнологиям для миниатюризации компонентов портативных ТЭ. Микроструктурирование кремния позволяет создать:

- каналы подачи топлива, окислителя и отвода продуктов реакции;
- пористые электроды (анод и катод) с высокоразвитой активной поверхностью, которая может быть использована для нанесения катализатора;
- радиаторы для отвода тепла.

Использование технологий современной кремниевой электроники и микроэлектромеханики позволило разработать способы создания многофункциональных электродных структур из пористого кремния. Изготавливаемые на их основе электроды с размерами пор 1–100 мкм³ обеспечивают существенное уменьшение размеров и необходимую удельную эффективность ТЭ.

В качестве примера на рис. 5а показана регулярная канальная структура электрода из макропористого кремния, полученная методом фотоэлектрохимического травления [5]. Упрощенная разновидность этой технологии позволяет получать нерегулярные канальные структуры с хаотическим распределением каналов без использования масок на основе эффекта самоорганизации.

На рисунке 5б показано сечение многофункционального монолитного анода метанольного ТЭ, изготовленного на основе макропористого кремния в Институте проблем технологии микроэлектроники и особо чистых материалов РАН [6].

Для решения задачи формирования пористых электродов и очистки водорода на основе разработанной в ФТИ РАН технологии получения мезопористого кремния (диаметр пор 20 нм) методом двухстороннего анодного травления разработана методика изготовления электродов с 10-нанометровой водородосепарирующей кремниевой мембраной, эффективно работающих при комнатной температуре (рис. 5в).

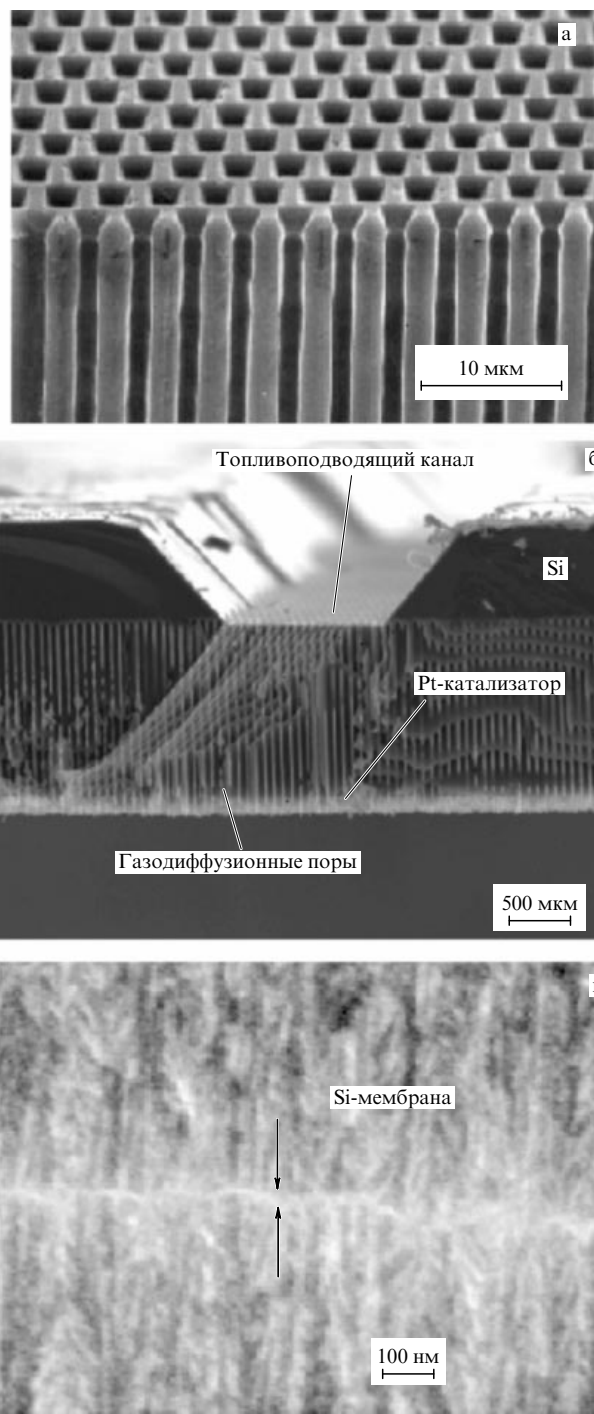


Рис. 5. (а) Регулярная канальная электродная структура макропористого кремния. (б) Сечение анодной части ТЭ. (в) Изображение поперечного сечения 10-нанометровой Si-мембраны, полученное с помощью просвечивающего микроскопа. Сверху и снизу от мембраны располагаются каналы диаметром примерно 20 нм.

щей кремниевой мембраной, эффективно работающих при комнатной температуре (рис. 5в).

5. Использование развитых технологий при создании портативных ТЭ. Путь возможного увеличения эффективности и удельной мощности ТЭ

Описанные выше технологии были задействованы при разработке ряда конструкций портативных ТЭ [7]. На рисунке 6 приведена схема одной из таких конструкций с

² Изначально развитие этих технологий в Физтехе было связано с другими задачами, в частности, касающимися применения так называемых фотонных кристаллов.

³ Такой материал называют "макропористым".

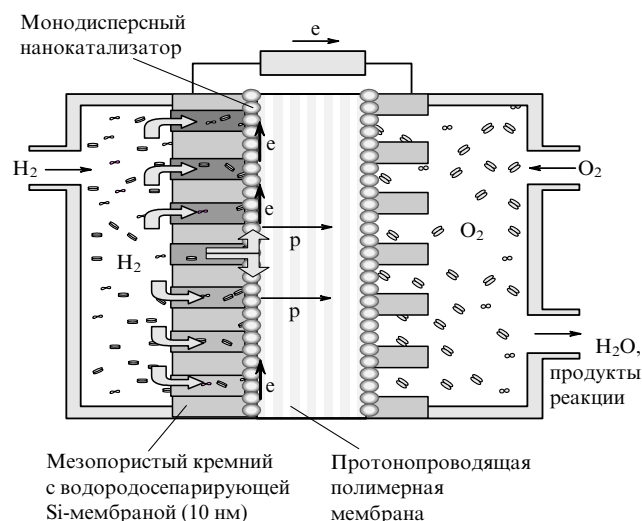


Рис. 6. Одна из разрабатываемых схем конструкций портативного ТЭ.

протонопроводящей полимерной мембраной, в которой используется технология нанесения монодисперсного нанокатализатора на электродную структуру из мезопористого кремния с водородосепарирующей 10-нанометровой Si-мембраной.

С целью увеличения реакционной зоны ТЭ в ФТИ РАН и Институте высокомолекулярных соединений РАН были разработаны промежуточные композитные слои на основе полимеров и нанотрубок [8]. Структура слоев показана на рис. 7. Они обладают смешанной электронно-протонной проводимостью. Их использование в электродных структурах позволяет рассчитывать на "расширение" зоны реакции и, следовательно, на повышение эффективности ТЭ.

6. Заключение

В настоящем докладе мы не касались вопросов разработки портативных ТЭ, выходящих за рамки темы этого доклада, т.е. не относящихся к микро- или нанотехнологиям, но также являющихся предметом наших исследований. К ним относится, например, задача оптимизации топлива для ТЭ. Дело в том, что наиболее широко применяемое ввиду его высокой энергоемкости топливо для портативных твердополимерных ТЭ — метанол — обладает рядом существенных недостатков, что заставляет изучать возможность его замены [9].

Если говорить о принципиальных трудностях на пути разработок, то к ним следовало бы отнести сопряжение элементов, изготавливаемых в разных технологических процессах, например совмещение твердополимерной мембраны с электродами из пористого неорганического материала.

Тем не менее выполненные исследования, включая описанное в докладе развитие наших базовых микро- и нанотехнологий, часть которых уже вышла на уровень лучших мировых аналогов⁴, позволяют рассчитывать на успешное решение задачи разработки эффективных портативных ТЭ в целом.

⁴ Например, результаты, достигнутые по монодисперсному нанокатализатору, и вовсе представляются уникальными.

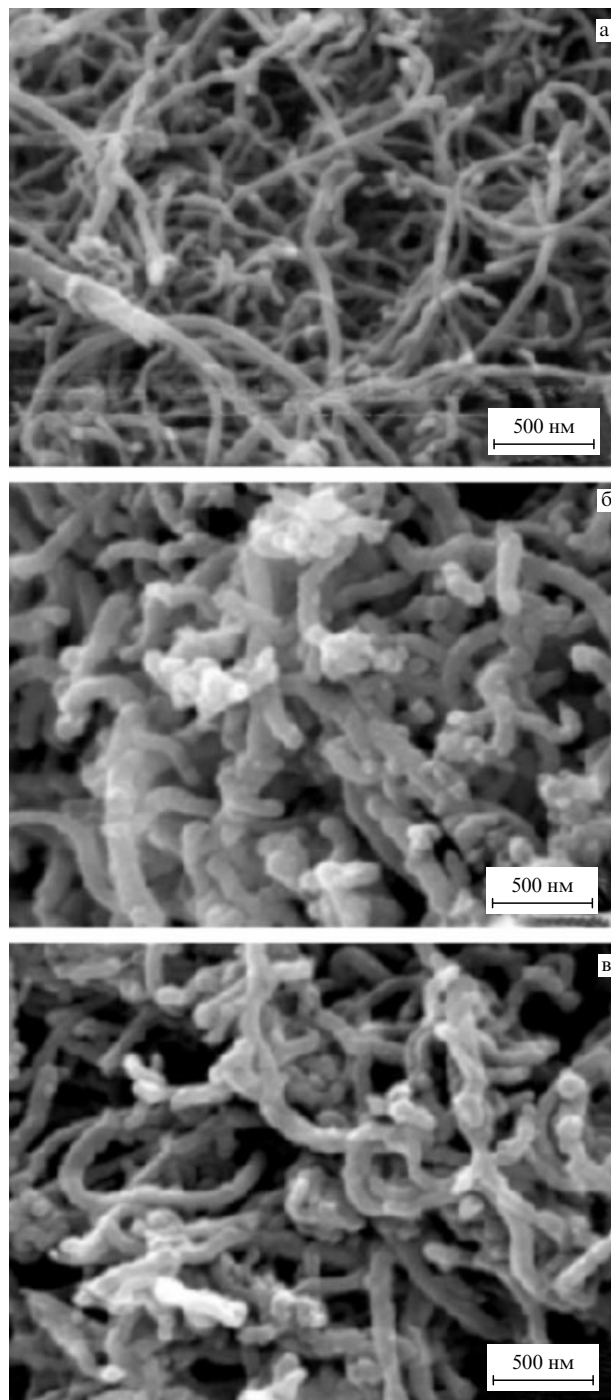


Рис. 7. Исходные углеродные нанотрубки (а); нанотрубки, покрытые полианилином (б, в), при 70 и 90 вес. % полианилина соответственно.

Список литературы

1. Larminie J, Dicks A *Fuel Cell Systems Explained* 2nd ed. (Chichester, WS: J. Wiley, 2003)
2. Кожевин В М и др. Докл. РАН **387** 785 (2002)
3. Ландау Л Д, Лифшиц Е М *Электродинамика сплошных сред* (М.: Гостехиздат, 1957)
4. Kozhevnikov V M et al. *J. Vac. Sci. Technol. B* **18** 1402 (2000)
5. Astrova E V et al. *J. Micromech. Microeng.* **14** 1022 (2004)
6. Vyatkin A et al. *J. Electrochem. Soc.* **149** G70 (2002)
7. Астрова Е В и др., в сб. *Международ. форум "Водородные технологии для производства энергии"*, Москва, 2005, Тезисы докладов (М., 2006) с. 188

8. Компан М Е, Сапурина И Ю, Стейжжал Я, в сб. *1 Российская конф. по физическим проблемам водородной энергетики, Санкт-Петербург, 2004*, Тезисы докладов (СПб., 2004) с. 23
9. Горячев Д Н, Малышкин В Г, Забродский А Г, в сб. *Международ. форум "Водородные технологии для производства энергии", Москва, 2005*, Тезисы докладов (М., 2006) с. 147

PACS numbers: **28.70.** + у, **47.90.** – х, **62.50.** + р

Физические исследования при ядерных взрывах

Е.Н. Аврорин, В.А. Симоненко, Л.И. Шибаршов

1. Введение

Ядерные заряды ("атомные и водородные бомбы") — одни из самых наукоемких технических устройств, созданных человечеством. Они потребовали концентрации знаний по широкому кругу областей науки и привлечения огромных технических и финансовых ресурсов. В свою очередь, создание ядерных зарядов стимулировало изучение физических процессов, происходящих в условиях, недостижимых в лабораторных экспериментах.

При ядерных взрывах реализуются давления до нескольких миллиардов атмосфер, температуры до нескольких сотен миллионов градусов, возникают интенсивные потоки электромагнитных излучений в диапазоне от радиочастот до частот жестких гамма-квантов и нейтронов с энергией от нескольких долей электрон-вольта до нескольких десятков мегавольт. В процессе взрыва имеют место разнообразные физические процессы: ударные и детонационные волны, кумуляция, турбулентность, фазовые превращения, радиационный перенос энергии, диссоциация и ионизация, ядерные и термоядерные реакции.

Таким образом, ядерные взрывы открывают уникальные возможности для фундаментальных и прикладных научных исследований, к сожалению, не полностью использовавшиеся.

Отметим те направления, по которым велись достаточно широкие исследования и были получены значительные результаты.

1. Изучение термодинамических свойств веществ, уравнений состояния, фазовых превращений.
2. Измерение оптической (интегральной и спектральной) прозрачности плотной плазмы.
3. Исследования термоядерного горения и термоядерной детонации.
4. Исследования электромагнитных излучений, сопровождающих ядерные взрывы.
5. Изучение радиационного воздействия на материалы и технологические элементы.
6. Получение далеких трансурановых элементов.
7. Измерения нейтронных сечений.
8. Создание мощных оптических и рентгеновских лазеров.

Эти исследования проводились в СССР и США как в специальных опытах с использованием ядерного взрыва, так и попутно с испытаниями зарядов и некоторыми промышленными применениями.

В исследованиях по большинству указанных направлений в нашей стране определяющей была роль двух ядерных центров, которые сейчас носят названия: Рос-

сийский федеральный ядерный центр (РФЯЦ) "Всероссийский научно-исследовательский институт экспериментальной физики" (ВНИИЭФ) (г. Саров) и РФЯЦ "Всероссийский научно-исследовательский институт технической физики им. Е.И. Забабахина" (ВНИИТФ) (г. Снежинск). По отдельным направлениям существенный вклад внесли другие отраслевые и академические институты. В этих работах участвовали также многочисленные организации, обеспечивающие подготовку и проведение взрывов. В проведение конкретных экспериментов важный вклад вносили полигоны и их службы.

2. Измерения пробегов излучения — первый специализированный физический опыт (1957 г.)

На определенных этапах ядерного взрыва преобладающим механизмом переноса энергии является лучистая теплопроводность. Важная роль процессов переноса энергии путем лучистой теплопроводности сначала была осознана применительно к звездам. Теория таких процессов начала создаваться в 1930-х годах. В составе вещества подавляющего большинства звездных объектов преобладают элементы с малыми атомными номерами. При этом основными механизмами взаимодействия квантов излучения с веществом являются тормозное взаимодействие и комптоновское рассеяние.

При ядерных взрывах возникают плотности энергии, величины которых сопоставимы со значениями, характерными для звездных объектов. Однако в случае ядерных взрывов положение осложняется тем, что в зарядах находятся вещества с большими атомными номерами. При высоких температурах они подвергаются многократной ионизации и имеют сложные энергетические спектры. В таких условиях существенный вклад во взаимодействие излучения с веществом начинают вносить переходы между возбужденными состояниями, процессы ионизации. Набор энергетических уровней, их состояние существенно зависят также от термодинамических условий. Получение этих данных даже сейчас представляет собой весьма сложную задачу, а в те далекие времена не была даже ясна важность роли этих процессов. Однако результаты испытаний уже первых систем, использующих радиационное обжигание, косвенно указывали на неточность имеющихся в то время данных по переносу излучения.

Поэтому в 1950-х годах одной из важнейших задач стало получение экспериментальной информации по пробегам излучения в веществах с высоким атомным номером. В 1956 г. для этой цели по инициативе руководителей ВНИИЭФ Я.Б. Зельдовича, А.Д. Сахарова, Ю.Б. Харитона был подготовлен и проведен физический опыт (ФО-1) с полномасштабным ядерным взрывом. Однако по методическим причинам (недостаточный учет воздействия радиационных потоков на средства регистрации) экспериментальную информацию получить не удалось. В 1957 г. аналогичный опыт (ФО-3) взялся провести молодой коллектив второго советского ядерного центра (ВНИИТФ). Схема установки, использованной в ФО-3, показана на рис. 1 (высота установки около 5 м, поперечный размер около 2 м).

Основные участники ФО-3:

Исходное предложение — Я.Б. Зельдович, А.Д. Сахаров.

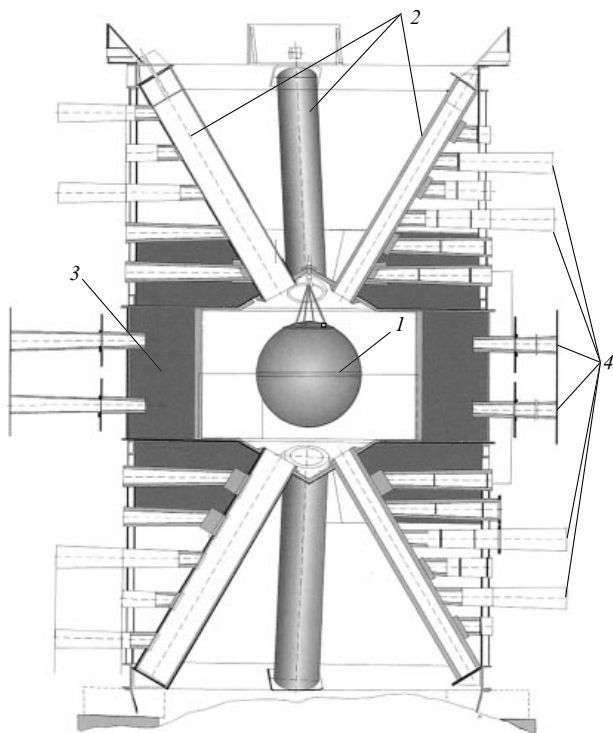


Рис. 1. Схема установки ФО-3: 1 — заряд; 2 — трубы для вывода излучения; 3 — бак с водой; 4 — световые каналы.

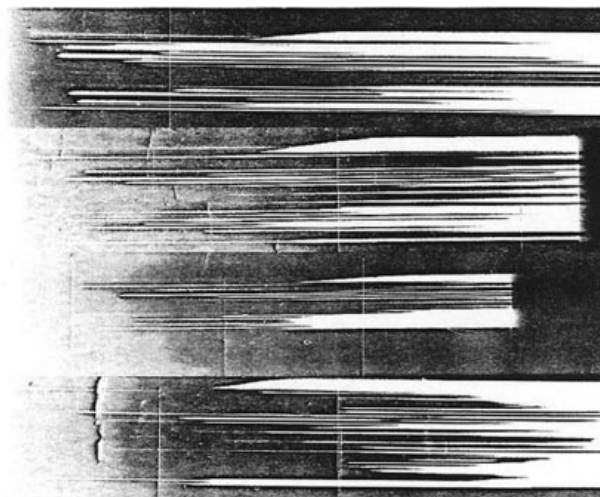


Рис. 2. Примеры фотохронограмм ФО-3. 1 мм на пленке соответствовал ~ 40 нс.

Инициатива проведения данного опыта — К.И. Щелкин, Е.И. Забабахин, Ю.А. Романов, В.С. Имшенник.

Научное руководство — Ю.А. Романов.

Выбор редакции опыта, расчетно-теоретические работы, обработка результатов — Е.Н. Аврорин.

Конструкторские работы — В.Ф. Гречишников, В.Д. Кирюшкин, А.С. Красавин.

Физические измерения — А.Д. Захаренков, В.К. Орлов, А.С. Дубовик, П.В. Кевлишвили.

Руководство проведением опыта на полигоне — В.Ю. Гаврилов.

Исходная идея опыта основывалась на том, что затухание потоков энергии вдоль труб зависит от теплопроводности стенок: чем больше теплопроводность стенки, тем быстрее затухает поток энергии. Энергия, поглощенная отдельными участками стенок труб, определялась по скорости ударной волны в измерительных элементах, вмонтированных в стенки. Момент выхода волны на наружную поверхность элемента фиксировался по появлению оптической вспышки. С учетом опыта ФО-1 особое внимание уделялось надежности измерений. Большую помощь в выборе надежной редакции опыта оказал Я.Б. Зельдович. Регистрация оптического излучения проводилась с расстояний от 2 до 5 км посредством скоростных фоторегистраторов, разработанных в Институте химической физики АН СССР. Примеры фотохронограмм, полученных в опыте, приведены на рис. 2.

Обширный экспериментальный материал, полученный в ФО-3 (а также обработка результатов ряда испытаний термоядерных зарядов, проведенная М.П. Шумаевым), подтвердили необходимость учета влияния связанно-связанных переходов.

Результаты опытов стимулировали интенсивное развитие квантово-механических моделей для расчета

непрозрачностей веществ. Важнейший вклад в развитие теоретических работ внесли Я.Б. Зельдович и Ю.Н. Бабаев. Непосредственная разработка теоретических моделей и алгоритмов вычислений, накопление расчетных данных осуществлялось в Институте прикладной математики АН СССР А.Ф. Никифоровым, В.Б. Уваровым [1] и их сотрудниками.

3. Изучение уравнений состояния и фазовых превращений веществ при динамических нагрузках

В программу большого числа специальных физических опытов и испытаний ядерных зарядов входили работы по изучению свойств веществ в динамических процессах при рекордно высоких давлениях (до 3,6 Гбар) [2, 3]. Наиболее просто были реализованы измерения ударно-волновой сжимаемости методом отражений, разработанным для исследований с помощью химических взрывчатых веществ Л.В. Альтшулером, К.К. Крупниковым и др. [4, 5]. Этот метод предполагает, что известно уравнение состояния эталонного вещества (обычно в качестве эталона использовались Fe или Al).

Натурный опыт с постановкой таких измерений впервые был проведен сотрудниками ВНИИТФ в марте 1966 г. Схема постановки таких опытов и проведения измерений была разработана В.А. Симоненко, К.К. Крупниковым и Л.П. Волковым.

В качестве примера на рис. 3 показана одна из модификаций схемы постановки измерений. В горном массиве вокруг бокса с зарядом создавалась обводная выработка, в которой сооружались ниши для размещения измерительных блоков. Измерительные блоки размещались на гладких площадках, изготовленных в горной породе. Гладкая поверхность устанавливалась перпендикулярно направлению на центр взрыва. Регистрация моментов прихода ударной волны в заданные точки осуществлялась с помощью электроконтактных датчиков.

Уже в первом опыте была реализована расширенная программа с постановкой шести измерительных блоков. С помощью одного из них измерялась ударная сжимаемость гранита относительно ударной сжимаемости железа. Была получена точка на ударной адиабате

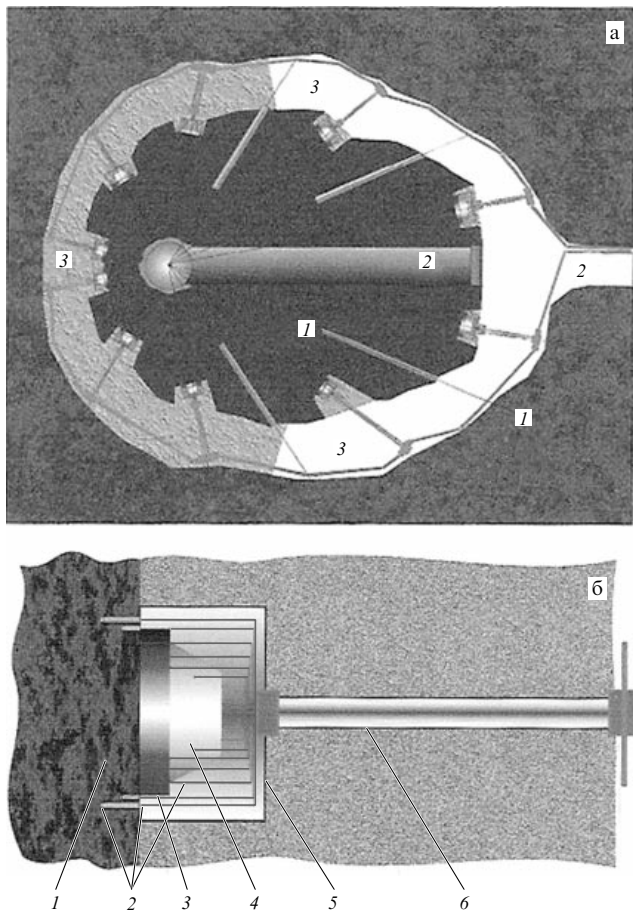


Рис. 3. (а) Схема опыта по изучению относительной сжимаемости различных веществ: 1 — массив горной породы; 2 — основная штольня; 3 — кольцевая проходка. (б) Схема устройства и размещения измерительного блока: 1 — горная порода; 2 — контактные датчики; 3 — эталонное вещество; 4 — исследуемый образец; 5 — защитный кожух; 6 — защитная труба с кабелями.

гранита при давлении в два раза выше достигнутого к тому времени в лабораторных экспериментах. В дальнейшем были уточнены ударные сжимаемости воды и алюминия, зафиксировано влияние процесса плавления на эволюцию фронта ударной волны в кварците. Всего за время проведения подземных испытаний специалисты ВНИИТФ провели исследования с применением более 60 измерительных блоков. В частности, такая же постановка измерений применялась при проведении последнего ядерного испытания института в 1988 г. В этом опыте были получены ценные данные по ударной сжимаемости кварцита и по раздвоению волны в кварце в области фазового перехода кварц–стишовит [6] по ударному сжатию пористого алюминия.

В аналогичной постановке проводились исследования сотрудниками ВНИИЭФ первоначально под руководством Л.В. Альтшулера, а затем Р.Ф. Трунина. Результаты представлены в обзорах [5].

По совокупности данных можно сделать вывод о существовании двух фазовых переходов в кварците: при давлении 230–350 кбар (переход от обычной фазы к высокоплотной) и при давлении около 1,15 Мбар (плавление) [7]. На рисунке 4 показана ударная адиабата в области смены фаз.

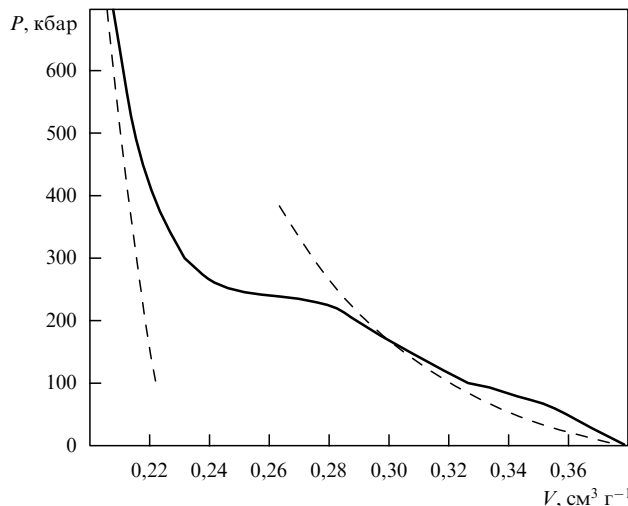


Рис. 4. Сплошная кривая — обработка экспериментальных данных, штриховая кривая — расчетные адиабаты для обычной и высокоплотной фаз.

Первоначально для построения широкодиапазонных уравнений состояния использовались данные модели Томаса–Ферми (ТФ) с различными поправками [8–11]. Однако модель ТФ не учитывает нерегулярное влияние электронных оболочек атомов. В ряде подземных ядерных взрывов исследовалось, в какой мере оно сказывается при ударно-волновых сжатиях плотных сред. Были выполнены методом отражения измерения ударной сжимаемости алюминия, свинца, воды и кварца относительно ударной сжимаемости железа [12, 13] при рекордно высоких давлениях. Экспериментальные данные по ударным адиабатам алюминия и свинца представлены в табл. 1 [14].

Эта информация позволяет судить о применимости различных теоретических моделей в обсуждаемой области [15–19].

Описанные выше результаты были получены относительным методом, предполагающим знание уравнения состояния эталонного вещества.

Абсолютные измерения ударно-волновой сжимаемости требуют одновременного измерения массовой скорости и скорости ударной волны. Известные лабораторные методы определения массовой скорости имеют физические ограничения при высоких давлениях и скоростях.

Таблица 1. Ударные адиабаты

Алюминий			Свинец		
$D, \text{ км с}^{-1}$	$P, \text{ Мбар}$	$\delta = \rho/\rho_0$	$D, \text{ км с}^{-1}$	$P, \text{ Мбар}$	$\delta = \rho/\rho_0$
43,57	36,3	3,73	30,42	79,6	4,13
49,45	48,5	4,00	35,0	107,2	4,37
50,53	50,6	4,05	35,44	111,6	4,60
65,22	87,3	4,55	46,6	197,3	5,00
75,03	115,9	4,61	53,43	262,4	5,26
80,11	132,5	4,66	56,98	300,2	5,40
85,98	152,5	4,64	61,33	346,5	5,31
107,10	237,9	4,73	76,7	543,8	5,39

Примечание. D — скорость ударной волны, P — давление на фронте, ρ_0 и ρ — начальная плотность вещества и плотность за фронтом ударной волны соответственно.

Американские исследователи [20] предложили схему измерений массовой скорости в области высоких давлений, которая основана на смещении резонансов взаимодействия нейтронов с ядрами движущегося вещества по отношению к их положению у покоящихся ядер (доплеровский сдвиг).

Наиболее ярко резонансы выражены у молибдена, который и исследовался в [20]. В уране было реализовано давление $P \approx 90$ Мбар, в молибдене зафиксированы скорость ударной волны $D = 18,7$ км с^{-1} и массовая скорость за фронтом ударной волны $U = 10,2$ км с^{-1} . Достигнутая в измерениях скорости точность $\pm 5\%$ не позволяет использовать полученную экспериментальную точку для калибровки уравнений состояния молибдена. Главные источники погрешности измерений связаны с неопределенностью длительности источника нейтронов и различными механизмами размытия резонансов, однако вклад в погрешность многих из этих факторов ослабевает с увеличением массовой скорости, так что при $U \approx 100$ км с^{-1} имеется принципиальная возможность достижения точности $\Delta U/U \approx 1\%$.

В работе [21] предложен способ одновременного измерения величин D и U с помощью гамма-активных реперных слоев, внедренных в исследуемое вещество; интенсивный гамма-источник может быть получен при импульсном облучении нейтронами вещества, ядра которого обладают сечением радиационного захвата, превосходящим в $\sim 10^3$ раз соответствующие сечения исследуемого вещества. В реперных слоях можно использовать европий, для которого при $E_n = 10-100$ эВ сечение (n, γ)-реакции составляет $\sigma = 220 \pm 80$ б. В процессе газодинамического движения реперные слои увлекаются движущимся веществом. С помощью системы коллимирующих щелей фиксируются моменты прохождения ими контрольных положений (рис. 5).

В применении метода отражения в качестве эталонного вещества широко использовался алюминий. В области давления 5–150 Мбар имеются существенные неоднозначности в уравнении состояния этого вещества. Это и обусловило интерес к алюминию в первых применениях нового метода. Результаты измерений с учетом последних методических достижений при обработке осциллограмм, учета нестационарности движений и реперных слоев приведены в табл. 2.

Опыт применений гамма-реперного метода измерений ударной сжимаемости показывает, что имеются

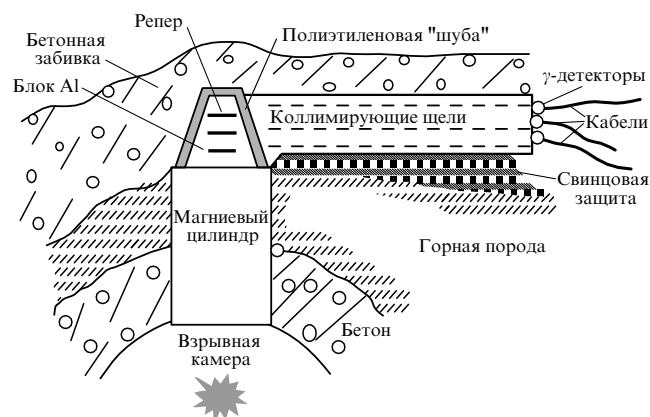


Рис. 5. Схема опыта с гамма-реперами.

Таблица 2. Результаты абсолютных измерений в алюминии

№ опыта	ρ_0 , г см^{-3}	D , км с^{-1}	U , км с^{-1}	P , Мбар	$\delta = \rho/\rho_0$
1	2,71	$24,2 \pm 0,7$	$15,1 \pm 0,4$	$9,9 \pm 0,3$	$2,65 \pm 0,1$
2	2,71	$23,4 \pm 0,6$	$14,5 \pm 0,3$	$9,3 \pm 0,2$	$2,63 \pm 0,07$
3	2,71	40 ± 5	30 ± 2	32 ± 5	$3,9 \pm 1,2$

большие возможности совершенствования его при использовании различных сочетаний репера и исследуемого материала.

4. Исследования термоядерного горения

В ряде взрывных экспериментов изучались условия термоядерного воспламенения дейтерия и дейтериево-тритиевой смеси.

Теоретический критерий термоядерной вспышки был получен в работе сотрудников ВНИИТФ и ВНИИЭФ [22].

Обобщение критерия на случай неоднородного сжатия и нагрева термоядерного горючего проведено в работе [23].

Проблема термоядерного воспламенения оказалась очень сложной. В 1956–1962 гг. оба института предпринимали ряд попыток воспламенить "чистые" узлы (конструкции, содержащие термоядерное горючее, но не содержащие делящихся материалов).

Впервые это удалось в 1963 г. (ВНИИЭФ, В.Б. Адамский, В.Н. Мохов, Ю.А. Трутнев).

Важнейшее значение имел опыт, проведенный в 1965 г. ВНИИТФ по предложению Л.П. Феоктистова. В этом опыте было получено воспламенение дейтериевого и дейтерий-тритиевого узлов и начато исследование возможности термоядерной детонации.

Руководство опытом — Е.И. Забабахин.

Конструкторские работы — Б.В. Литвинов.

Расчетно-теоретические работы — Л.П. Феоктистов, Е.Н. Аврорин, А.К. Хлебников, Л.И. Шибаршов, Е.Г. Гамалий.

Физические измерения — Ю.А. Зысин, А.И. Сауков, В.Г. Рукавишников.

На основании результатов этого физического опыта в 1966 г. было осуществлено горение газообразного дейтерия с мощностью около 100 кт. В 1972 г. в результате совместных работ ВНИИЭФ и ВНИИТФ было проведено испытание рекордного по "чистоте" (с минимальным количеством радиоактивных продуктов) промышленного заряда мощностью 140 кт с возможностью практически неограниченного увеличения мощности (Ю.С. Вахрамеев, В.Н. Мохов, А.В. Певницкий, Е.Н. Аврорин, Б.В. Литвинов, Б.П. Мордвинов).

В 1967 г. был проведен опыт по определению пределов зажигания газообразного дейтерия (испытан набор термоядерных узлов различных размеров). Предельные размеры оказались весьма близкими к расчетным.

В нескольких опытах была предпринята попытка моделирования мишени для лазерного термоядерного синтеза. Однако не удалось обеспечить термоядерное воспламенение таких моделей. По-видимому, причиной являлась недостаточная точность изготовления моделей и неоднородность облучения.

Интерес к термоядерной детонации труб, заполненных дейтериево-тритиевой (ДТ) смесью (ДТ-шнуров), возник в 1970-х годах с точки зрения возможности

получения неограниченного выигрыша в энергии в инерциальном термоядерном синтезе.

Во ВНИИТФ по инициативе Л.П. Феокистова начались теоретические, а затем и экспериментальные исследования детонации.

Теоретически детонация изучалась как путем расчетного моделирования [24], так и с помощью аналитических расчетов и оценок [25].

Термоядерная детонация оказалась, по выражению Л.П. Феокистова, заметно более "физически насыщенной", чем детонация взрывчатых веществ (ВВ).

Приходится учитывать разнообразные физические явления:

- термоядерные реакции;
- электронную и фотонную теплопроводность;
- гидродинамическое движение;
- перенос альфа-частиц;
- перенос нейтронов.

В зависимости от параметров ведущим оказывается тот или иной процесс: имеет место либо "гидродинамическая" детонация, либо сверхзвуковая волна горения.

Л.П. Феокистову и его сотрудникам удалось получить оценку для основных параметров термоядерной детонации: скорости детонации и предельного размера детонирующего шнура. Любопытное совпадение: предельный диаметр для термоядерной детонации дейтерий-тритиевой смеси по порядку величины оказался близким к критическим диаметрам мощных ВВ.

В ряде экспериментов эти оценки подтвердились с приемлемой точностью. С помощью энергии ядерного взрыва производилось предварительное сжатие ДТ-шнуров и зажигание. Было достигнуто сжатие ДТ-смеси до $\sim 10 \text{ г см}^{-3}$. Диаметры сжатых шнуров были на 2–3 порядка меньше их длины. В экспериментах детонация прекращалась при диаметре, несколько большем, чем по расчетным предсказаниям. По-видимому, это связано с неоднородностью сжатия и нагрева термоядерной смеси.

Измерены скорость детонации в пределах от 5×10^8 до $8 \times 10^8 \text{ см с}^{-1}$ и максимальные температуры 50–70 кэВ в согласии с теорией. На рисунке 6 в качестве примера показан полученный после одного из опытов фотоотпечаток интегральных по времени нейтронных изображений нескольких ДТ-шнуров.

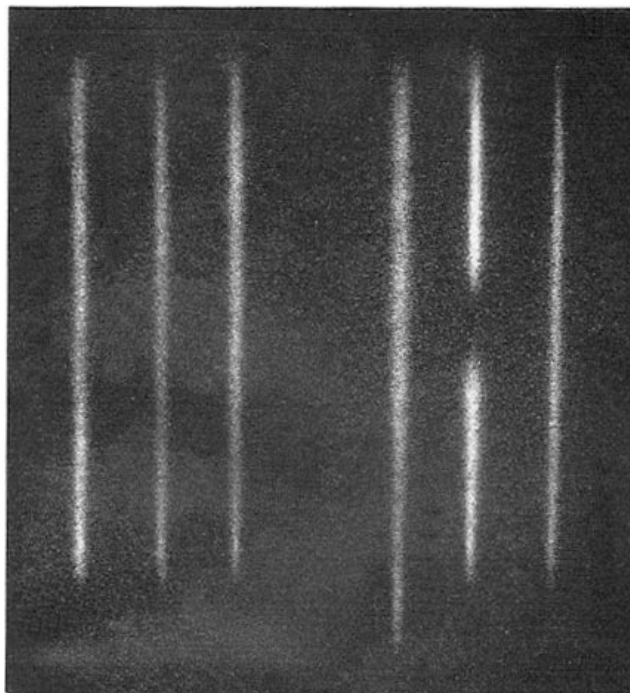


Рис. 6. Изображения детонирующих шнуров.

5. Комплексный физический опыт 1983 года

Программа эксперимента включала в себя измерения ударной сжимаемости алюминия и свинца относительно таковой железа, а также сжимаемости железа относительно таковой свинца методом отражения (часть горизонтальных каналов). По другим каналам осуществлялись измерения усредненных и спектральных значений оптической прозрачности в алюминии и железе (вторая часть горизонтальных каналов), изучение режимов термоядерной детонации (верхняя часть установки). Схема установки опыта показана на рис. 7.

Для получения информации при максимальных давлениях измерительные блоки размещались в непосредственной близости к ядерному заряду. Большие радиационные потоки не позволили использовать электрорезистивные датчики, поэтому применялась оптическая регистрация.

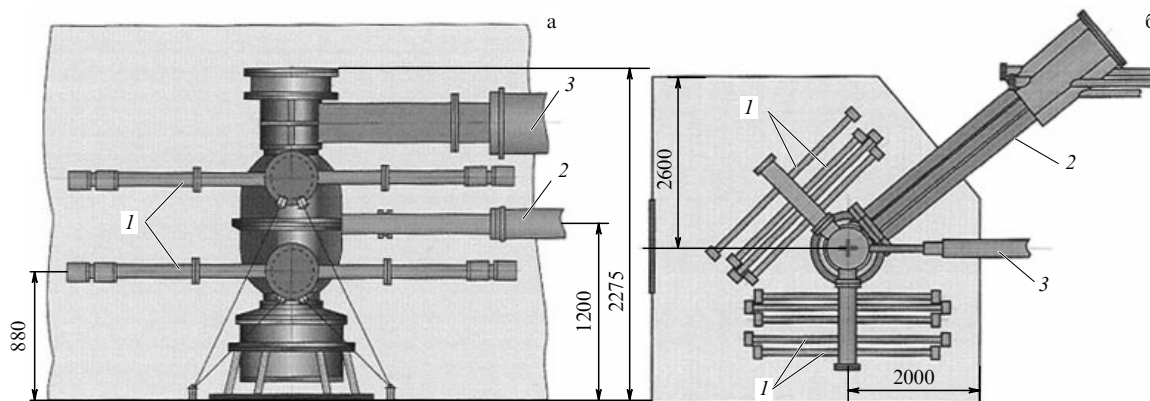


Рис. 7. Схема установки комплексного опыта 1983 г.: (а) вид сбоку, (б) вид сверху. 1 — световые каналы для ударно-волновых и интегральных оптических измерений; 2 — каналы спектральных оптических измерений; 3 — каналы для регистрации термоядерной детонации.

В опыте были получены данные по ударной сжимаемости алюминия и свинца относительно сжимаемости железа, а также сжимаемости железа относительно таковой для свинца, уточнены пробеги излучения (интегральные и спектральные) и измерены основные параметры термоядерной детонации.

6. Получение трансурановых изотопов

Используя интенсивные нейтронные потоки ядерного взрыва, американские и советские ученые получили ряд новых изотопов трансурановых элементов [26, 27]:

- ^{244}Pu , ^{245}Pu , ^{246}Pu ;
- ^{246}Am ;
- ^{246}Cm , ^{247}Cm , ^{248}Cm ;
- ^{249}Bk ;
- ^{249}Cf , ^{252}Cf , ^{253}Cf , ^{254}Cf ;
- ^{253}Es , ^{255}Es ;
- ^{255}Fm .

В конце 1980-х годов началось сотрудничество советских ядерных центров с американскими ядерными лабораториями. В частности, были начаты обсуждения возможности проведения международных научных экспериментов с использованием энергии ядерного взрыва.

Мораторий на ядерные испытания, объявленный СССР в 1989 г., и последующее заключение Договора о всеобъемлющем запрещении ядерных испытаний вызвали прекращение таких исследований.

Список литературы

1. Никифоров А Ф, Новиков В Г, Уваров В Б *Квантово-статистические модели высокотемпературной плазмы: Методы расчета росселандовых пробегов и уравнений состояния* (М.: Физматлит, 2000)
2. Аврорин Е Н, Водолага Б К, Симоненко В А, Фортов В Е *УФН* **163** (5) 1 (1993)
3. Трунин Р Ф *УФН* **164** 1215 (1994)
4. Альтшулер Л В *УФН* **85** 197 (1965)
5. Альтшулер Л В, Зельдович Я Б, Стяжкин Ю М *УФН* **167** 107 (1997); Альтшулер Л В и др. *Вестн. РАН* **74** 1011 (2004)
6. Вильданов В Г и др. *Химическая физика* **14** (2–3) 122 (1995)
7. Жугин Ю Н и др. *Физика Земли* **35** (6) 46 (1999)
8. Latter R *Phys. Rev.* **99** 1854 (1955)
9. Киржниц Д А *ЖЭТФ* **32** 115 (1957)
10. Калиткин Н Н, Кузьмина Л В, Препринт № 35 (М.: ИПМ АН СССР, 1975)
11. Копышев В П *Численные методы механики сплошных сред* **8** (6) 54 (1977)
12. Аврорин Е Н и др. *Письма в ЖЭТФ* **31** 727 (1980)
13. Аврорин Е Н и др. *ЖЭТФ* **93** 613 (1987)
14. Аврорин Е Н и др. *Письма в ЖЭТФ* **43** 241 (1986)
15. Трошин О В *Изв. вузов. Сер. Физ.* (4) 57 (1968)
16. Zink J W *Phys. Rev.* **176** 279 (1968)
17. Синько Г В *Численные методы механики сплошных сред* **10** (3) 124 (1979)
18. Никифоров А Ф, Новиков В Г, Уваров В Б, в сб. *Математическое моделирование. Физико-химические свойства вещества* (Отв. ред. А А Самарский, Н Н Калиткин) (М.: Наука, 1989) с. 162
19. More R M et al. *Phys. Fluids* **31** 3059 (1988)
20. Ragan III C E, Silbert M G, Diven B C *J. Appl. Phys.* **48** 2860 (1977)
21. Симоненко В А и др. *ЖЭТФ* **88** 1452 (1985)
22. Вахрамеев Ю С, Мохов В Н, Попов Н А *Атомная энергия* **49** (2) 91 (1980)
23. Аврорин Е Н, Феоктистов Л П, Шибаршов Л И *Физика плазмы* **6** 965 (1980)
24. Аврорин Е Н и др. *Физика плазмы* **10** 514 (1984)
25. Феоктистов Л П *УФН* **168** 1247 (1998)
26. Ingley J S *Nucl. Phys. A* **124** 130 (1969)
27. Адамский В Б *Атомная энергия* **81** 207 (1996)