

П И С Ь М А
В ЖУРНАЛ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ
И ТЕОРЕТИЧЕСКОЙ ФИЗИКИ

ОСНОВАН В 1965 ГОДУ
ВЫХОДИТ 24 РАЗА В ГОД

ТОМ 72, ВЫПУСК 8
25 ОКТЯБРЯ, 2000

Письма в ЖЭТФ, том 72, вып.8, стр.577 - 582

© 2000г. 25 октября

ГЕНЕРАЦИЯ НЕЙТРОНОВ В ПЛОТНОЙ ФЕМТОСЕКУНДНОЙ
ЛАЗЕРНОЙ ПЛАЗМЕ СТРУКТУРИРОВАННОЙ
ТВЕРДОТЕЛЬНОЙ МИШЕНИ

Р.В.Волков, Д.М.Голишников, В.М.Гордиенко, П.М.Михеев, А.Б.Савельев¹⁾,
В.Д.Севастьянов⁺, В.С.Черныш, О.В.Чутко

Международный учебно-научный лазерный центр и физический факультет
МГУ им. М.В.Ломоносова
119899 Москва, Россия

⁺ Всероссийский научно-исследовательский институт физико-технических и
радиотехнических измерений
141570 Менделеево, Московская обл., Россия

Поступила в редакцию 8 сентября 2000 г.

Сообщается о получении нейтронов в результате реакции ${}^2\text{H}(d, n){}^3\text{He}$ в твердотельной наноструктурированной мишени при ее облучении фемтосекундным лазерным импульсом с интенсивностью $20 \text{ ПВт}/\text{см}^2$ ($1 \text{ ПВт} = 10^{15} \text{ Вт}$). Структурированность мишени достигалась предварительным облучением мишени лазерным импульсом той же интенсивности.

PACS: 25.60.Pj, 29.25.Dz, 52.40.Nk

1. В последнее время опубликован ряд работ по наблюдению ядерных процессов в плазме, создаваемой субпикосекундным лазерным импульсом: возбуждение ядерных уровней и инициирование распада ядер [1–3], термоядерные реакции и генерация нейтронов [4–6].

Нейтроны, возникающие вследствие реакции ${}^2\text{H}(d, n){}^3\text{He}$ в лазерной плазме были впервые зарегистрированы в работе [7], связанной с лазерным управляемым термоядерным синтезом. По сравнению с плазмой наносекундного или субнаносекундного лазерного импульса в случае фемтосекундного (субпикосекундного) лазерного импульса высокая скорость ввода энергии в твердотельное вещество (даже при относительно малой энергии лазерного импульса в $0.1 - 100 \text{ мДж}$) приводит к “мгновенному” нагреву электронов плазмы до температур свыше 1000 эВ . Однако большая часть экспериментов [2, 3, 5, 6] со сверхкороткими лазерными импульсами была выполнена

¹⁾ e-mail: savelev@femto.phys.msu.su

в так называемом релятивистском режиме взаимодействия излучения с веществом при интенсивностях более 10^{18} Вт/см². Вместе с тем, переход к нерелятивистскому режиму взаимодействия с применением фемтосекундных систем настольного типа открывает путь к практическому использованию нейтронных и иных источников сверхкороткой длительности.

В настоящей работе сообщается о получении нейтронов в результате реакции ${}^2\text{H}(d, n){}^3\text{He}$ в твердотельной наноструктурированной мишени при ее облучении фемтосекундным лазерным импульсом с интенсивностью 20 ПВт/см² (1 ПВт = 10^{15} Вт).

2. В плазме сверхкороткого лазерного импульса нагрев ионов плазмы до температуры в 10–100 эВ происходит за счет электрон-ионных столкновений на временах в 1–10 пс. При такой температуре ионов скорость термоядерных реакций мала [8]. В то же время, вследствие разлета плазмы в вакуум энергия ионов может достигать десятков килоэлектронвольт. Для получения плазмы твердотельной плотности с высокой температурой ионов нами было предложено использовать наноструктурированные мишени [9]. В таких мишенях под действием сверхкороткого лазерного импульса происходит взрыв отдельных элементов структуры, причем разлет каждого элемента носит трехмерный характер. Столкновение ионных “струй” приводит к кумулятивному эффекту и формированию на временах в 100–500 фс плазмы с ионной температурой более 10 кэВ.

До настоящего времени нейтроны, возникающие вследствие термоядерной реакции в плазме сверхкороткого лазерного импульса, зарегистрированы при малой средней плотности плазмы – порядка и ниже критической. В работе [4] разогрев ионной компоненты происходил в плазменном канале при релятивистской самофокусировке лазерного пучка. Иной подход связан с использованием струй нанометровых кластеров, быстрый разогрев которых приводит к кулоновскому взрыву кластеров с энергией легких ионов до 10 кэВ. Столкновения ионов дейтерия от различных кластеров и приводит к ${}^2\text{H}(d, n){}^3\text{He}$ -реакции с образованием нейтронов [6]. Однако низкая средняя плотность плазмы определяет малую эффективность реакции, поскольку число нейтронов N_n , возникающих в плазме, пропорционально квадрату плотности дейтронов n_D :

$$N_n \approx 0.25 \cdot n_D^2 \langle \sigma v \rangle_{DD} \tau V, \quad (1)$$

где τ – время существования плотной плазмы и/или ее остывания, V – объем плазмы, $\langle \sigma v \rangle_{DD}$ – усредненная по максвелловскому распределению скорость термоядерной реакции [8].

Нами в работе [9] было предложено использовать для генерации нейтронов твердотельные наноструктурированные мишени, насыщенные дейтерием. Это обстоятельство и лежит в основе настоящей экспериментальной работы. Существенно, что при таком режиме взаимодействия длительность нейтронного импульса τ ограничивается на уровне менее 10 пс вследствие быстрого уменьшения плотности плазмы при ее разлете в вакуум.

3. В наших экспериментах (см. рис.1) использовалось излучение фемтосекундной лазерной системы на красителях [10] с длительностью импульса 200 фс и энергией W до 1 мДж (контролирувавшейся с помощью детектора D3). Контраст импульса по интенсивности был не хуже 10^5 . Фокусировка этого излучения безаберрационным объективом L с фокусным расстоянием 6 см обеспечивала интенсивность на мишени 10–50 ПВт/см². Контроль точности настройки фокусирующего объектива проводил-

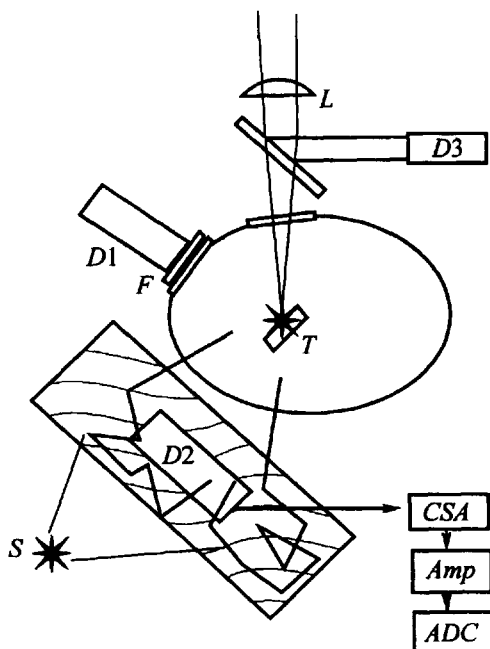


Рис.1. Схема эксперимента

ся по измерению выхода рентгеновского излучения с энергией квантов свыше 9 кэВ с помощью детектора *D1* (сцинтилляционный счетчик $\text{NaI}(\text{Te})$), снабженного фильтром *F* (200 мкм Be и 100 мкм Al). Мишени *T* помещались в малую камеру размером $5 \cdot 5 \cdot 5 \text{ см}^3$ с давлением остаточного газа не хуже 10^{-2} торр. Малый размер вакуумной камеры взаимодействия и размещение детектора нейтронов на расстоянии 12 см от плазменного фокуса позволили проводить эксперименты при малых энергиях лазерного излучения $\sim 1 \text{ мДж}$.

В экспериментах использовался ряд дейтерированных мишеней (Ti , Si , Pd), однако наилучшие результаты были получены с титаном. Образец представлял собой пластину молибдена толщиной 300 мкм с нанесенным на нее слоем титана с поверхностной плотностью 2.2 мг/см^2 . Титан был насыщен дейтерием до средней атомной концентрации 1.65. Исходя из данных по обратному резерфордскому рассеянию водорода, было получено, что концентрация дейтерия в 0.6 атомной достигается на глубине 0.3 мкм.

Нами разработана двухимпульсная методика получения лазерномодифицированных мишеней: первый лазерный импульс формировал кратер диаметром порядка 5 мкм и глубиной около 1 мкм с сильно развитой поверхностью (см.рис.2). Под действием второго (разнесенного во времени на несколько секунд) на поверхности кратера возникала плазма с аномально высокой ионной температурой. Оценка температуры горячих электронов плазмы, проведенная по развитым нами методикам [11], показала, что плазма, формируемая в кратере, имеет высокую электронную температуру ($T \sim 6 \text{ кэВ}$), сравнимую с температурой, получаемой при облучении плоской мишени ($T \sim 4 \text{ кэВ}$). Отметим, что и второй импульс, в свою очередь, также модифицирует мишень-кратер, что позволяет использовать его для последующего облучения. Глубина кратера при этом возрастает. Максимальное

количество возможных выстрелов без смещения мишени оценивалось нами по уменьшению сигнала детектора $D1$ и составляло 5–6 в один кратер.

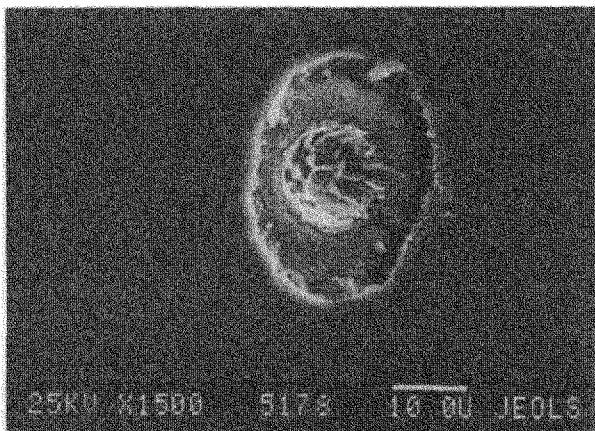


Рис.2. Электронограмма кратера на поверхности образца Ti (угол между нормалью к поверхности образца и пучком 30°). Горизонтальная белая черта в нижней части изображения соответствует 10 мкм

Для регистрации единичных нейтронов с энергией 2.3–2.6 МэВ использовался спектрометрический детектор нейтронов $D2$, состоящий из наполненного смесью He^3 и Ag счетчика, работающего в режиме ионизационной камеры. Счетчик помещался в полиэтиленовый замедлитель, выполненный в виде прямоугольного параллелепипеда размером $10 \cdot 10 \cdot 20$ см. Сигнал с детектора $D2$ через малошумящий зарядочувствительный предусилитель (CSA) и линейный усилитель (Amp) поступал на вход быстрого аналого-цифрового преобразователя (ADC) с буферной памятью 32 К. Запуск ADC был жестко синхронизован с лазерным импульсом. Типичный вид сигнала при регистрации одиночного нейтрона представлен на вставке к рис.3.

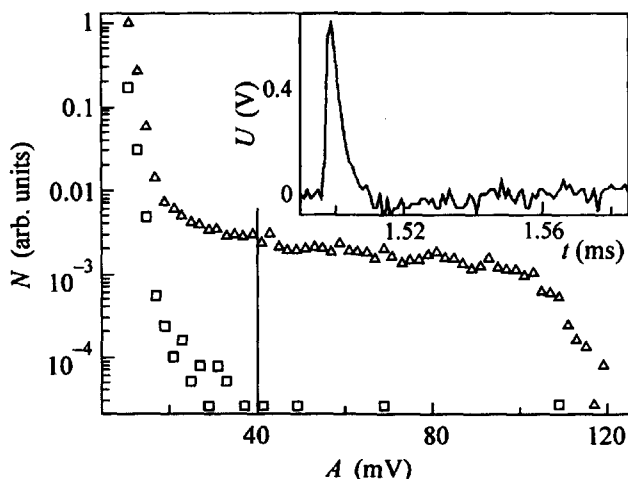


Рис.3. Гистограмма распределения числа импульсов N с заданной амплитудой A на выходе системы регистрации. Квадратики – без внешнего источника нейтронов, треугольники – с внешним источником

Калибровка и наладка схемы измерения проводилась с помощью тестового источника S , испускавшего 11200 нейтронов с энергией 3.2 МэВ в секунду. При калибровке детектора $D2$ источник S помещался по другую сторону от детектора, симметрично

по отношению к лазерной плазме. Гистограмма распределения амплитуд импульсов от источника S , наряду с гистограммой шумов, приведена на рис.3. Наличие у последней единичных отсчетов с большой амплитудой связано с регистрацией фоновых нейтронов (1 нейтрон за 10–15 с).

Для проведения экспериментов по регистрации нейтронов из лазерной плазмы был выбран порог в 40 мВ (см. вертикальную черту на рис.3). Исходя из известного нейтронного выхода источника S , эффективность регистрации нейтрона с энергией 2–3 МэВ с выбранным порогом регистрации оценена в 0.04%.

Следует отметить, что регистрация нейтронов в схеме с цифровым осциллографом позволяет учесть медленные изменения “нуля” предусилителя и селективировать нейтронный сигнал от шумов и наводок не только по амплитуде, но и по форме сигнала. Регистрация нейтронов производилась в течение 5 мс после поджига лазерной плазмы, что определялось характерным временем жизни теплового нейтрона в замедлителе. Измерение собственного нейтронного фона в наших экспериментальных условиях показало, что при длине выборки 5 мс вероятность регистрации фонового нейтрона составляет $5 \cdot 10^{-4}$.

Было произведено несколько серий экспериментов с анализом от 500 до 2000 лазерных выстрелов. В среднем за 2000 выстрелов регистрировалось 5 ± 2 нейтрона с амплитудой сигнала более 40 мВ (см. шкалу абсцисс рис.3). Исходя из известного значения вероятности регистрации фонового нейтрона в одном выстреле, вероятность, что один из зарегистрированных нейтронов – фоновый, близка к единице, а вероятность того, что все зарегистрированные нейтроны являются фоновыми, равна 0.04. Таким образом, с учетом квантовой эффективности регистрации нейтронного детектора, среднее число нейтронов в одном выстреле в объеме плазмы составило 5 ± 2 .

Сравним полученные значения с оценкой по формуле (1). Из выполненных время-пролетных измерений [12] следует, что энергия дейтронов составляет 1–3 кэВ. Тогда скорость реакции будет $(\sigma v)_{DD} \approx 10^{-20} \div 10^{-22} \text{ см}^3 \cdot \text{с}^{-1}$ [8]. Для общего числа нейтронов в объеме плазмы получаем $N_n \approx 0.2 - 20$ ($n_D \approx 3 \cdot 10^{22} \text{ см}^{-3}$, $\tau \approx 5 \text{ пс}$, $V \approx 10^{-12} \text{ см}^3$), что находится в разумном согласии с экспериментально измеренной величиной.

Сравнительный анализ наших результатов с результатами работы [6], в которой взаимодействие фемтосекундного лазерного излучения такой же интенсивности осуществлялось со струей дейтериевых кластеров, показывает, что число нейтронов в пересчете на единицу вложенной энергии в обоих случаях составляет $\sim 10^5$ нейтронов/Дж. В то же время, в наших экспериментах эффективность генерации нейтронов ($\eta \equiv N_n/Wn_DV \approx 10^{-6}$ нейтрон/Дж · атом) оказывается в 1000 раз выше, чем для кластерных мишеней. Это, несомненно, связано с твердотельной концентрацией атомов дейтерия в наших мишенях.

4. Увеличение общего числа нейтронов за один лазерный выстрел в используемых нами мишенях может быть достигнуто за счет увеличения энергии лазерного импульса и, как следствие, увеличения объема плазмы. Однако более эффективным представляется увеличение скорости реакции при повышении температуры ионов плазмы (что может быть достигнуто за счет совершенствования организации поверхности наноструктурированных металлических мишеней) либо за счет выбора реакции с большим сечением. Так, сечение ${}^3\text{H}(d, n){}^4\text{He}$ реакции превышает сечение

$^2\text{H}(d, n)^3\text{He}$ реакции по крайней мере на 2 порядка [8]. Используемый нами подход также может оказаться эффективным для генерации пикосекундных импульсов нейтронов больших энергий, протонов, альфа-частиц.

Таким образом, формирование высокотемпературной фемтосекундной плотной лазерной плазмы в наноструктурированных мишенях позволяет реализовать новые возможности, связанные с генерацией сверхкоротких импульсов частиц высоких энергий – нейтронов, протонов и др. А это, в свою очередь, представляет существенный интерес для ядерно-физических, материаловедческих и иных исследований с пико- и субпикосекундным временным разрешением.

Авторы выражают благодарность В.С.Куликаускасу за измерение профилей концентрации дейтерия в приповерхностном слое образцов и В.А.Серову за электронографические исследования кратеров. Работа выполнена при поддержке со стороны Российского фонда фундаментальных исследований (грант # 99-02-18343а), ГНТП “Фундаментальная метрология” и “Университеты России”.

-
1. А.В.Андреев, Р.В.Волков, В.М.Гордиенко и др., Письма в ЖЭТФ **69**, 343 (1999).
 2. K.W.D.Ledingham, I.Spencer, T.McCanny et al., Phys. Rev. Lett. **84**, 899 (2000).
 3. T.E.Cowan, A.W.Hunt, T.W.Phillips et al., Phys. Rev. Lett. **84**, 903 (2000).
 4. G.Pretzler, A.Saemann, A.Pukhov et al., Phys. Rev. **E58**, 1165 (1998).
 5. P.A.Norreys, A.P.Fews, F.N.Beg et al., Plasma Phys. Control. Fusion **40**, 175 (1998).
 6. J.Zweiback, R.A.Smith, T.E.Cowan et al., Phys. Rev. Lett. **84**, 2634 (2000).
 7. Н.Е.Басов, С.Д.Захаров, П.Г.Крюков и др., Письма в ЖЭТФ **8**, 26 (1968).
 8. К.Бракнер, С.Джорна, *Управляемый термоядерный синтез*, 1977, М.: Атомиздат (K.Brakner, S.Jorna, *Laser Driven Fusion*, 1973, KMS Fusion, Inc.).
 9. В.М. Гордиенко, А.Б. Савельев, УФН **169**, 78 (1999).
 10. Р.В.Волков, В.М.Гордиенко, М.С.Джиджоев и др., Квантовая электроника **24**, 1114 (1997).
 11. Р.В.Волков, В.М.Гордиенко, П.М.Михеев, А.Б.Савельев, Квантовая электроника **27**, №9 (2000).
 12. V.M.Gordienko, O.V.Chutko, D.M.Golishnikov et al., in: *Abstracts of 3-rd Intern. Symposium Modern Problems of Laser Physics*, Akademgorodok, Novosibirsk, Russia, July 2-7, 2000, p.62.