

**Определение состава плазмы,
создаваемой мощным лазерным импульсом**

*В. И. Дымович, С. Д. Захаров, П. Г. Крюков,
Ю. А. Матвеев, С. М. Сильнов*

Состав плазмы, образующейся при фокусировании мощного лазерного излучения на вещество с низким значением Z , определяется составом исходной мишени и, следовательно, может быть легко определен. Однако при использовании LiD — одного из наиболее удобных для получения термоядерной плазмы соединений, данные предварительного химического анализа могут быть отнесены строго лишь к веществу в глубине мишени. В особенности это относится к мишеням, некоторое время находившимся на воздухе. Дело в том, что LiD химически активен и легко загрязняется вследствие реакций*).



Кроме того на поверхности может происходить абсорбция различных газов и других примесей.

Образование плазмы мощным лазерным импульсом также происходит в тонком поверхностном слое мише-

*) В этих реакциях равновесие смещено вправо из-за образования легко уходящей от мишени изотопной модификации водорода HD .

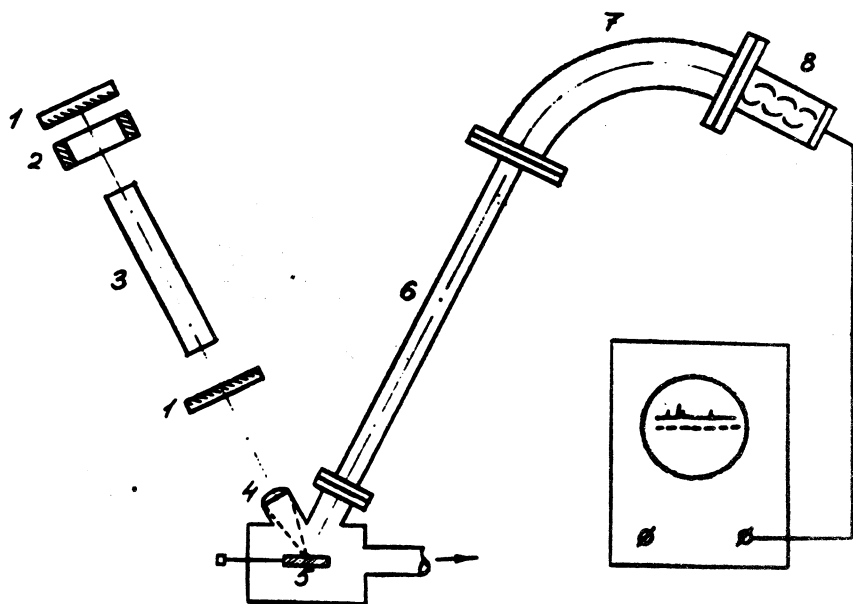
ни, толщина которого сравнима с длиной волны излучения (~ 1 мк) и известна с невысокой точностью. Заранее важно убедиться — есть ли в этом слое примеси и каков их состав, а также имеется ли в достаточном количестве дейтерий? Присутствие примесей в плазме снижает её температуру, которая, в свою очередь, наряду с концентрацией дейтерия будет определять интенсивность возможных термоядерных реакций.

Чтобы удовлетворить указанным требованиям, необходимо производить отбор пробы для анализа с помощью самого лазерного импульса. При этом анализироваться должна ионная компонента, так как при фокусировании на вещество мощного лазерного излучения после образования высокотемпературной плазмы обычно наблюдается выброс большой массы нейтральных частиц, связанных выходу ударной волны на поверхность. Для этой цели нами были применены две методики: лазерная времяпролетная масс-спектроскопия и метод лазерного генератора нейтронов¹.

Схема установки для анализа плазмы с помощью лазерного масс-спектрометра приведена на рис. 1. Лазер на кристалле рубина давал на выходе импульс длительностью 40 нсек с энергией 0,8 дж. Модуляция добротности осуществлялась раствором фталоцианина ванадия в нитробензоле. Масс-спектрометр имел электрический и магнитный анализаторы с углом отклонения 90° . Пролётное расстояние составляло 450 см; давление внутри вакуумной системы $\sim 10^{-6}$ тор. Подробнее конструкция и параметры масс-спектрометра описаны в работе².

Анализ масс-спектров образцов из LiD , несколько дней находившихся на воздухе, показал, что из основных элементов соединения в каждой вспышке уверенно наблюдались только ионы лития Li^+ , Li^{++} , Li^{+++} . В качестве примесей присутствовали водород, углерод, кислород, азот. Количество примесей менялось от точки к точке мишени. В случае, когда по одному и тому же участку мишени производилось несколько "вы-

стрелов", в первой вспышке наблюдался значительный пик, вызванный ионами водорода (рис. 2а). Сигнал, обусловленный ионами дейтерия, был значительно мень-

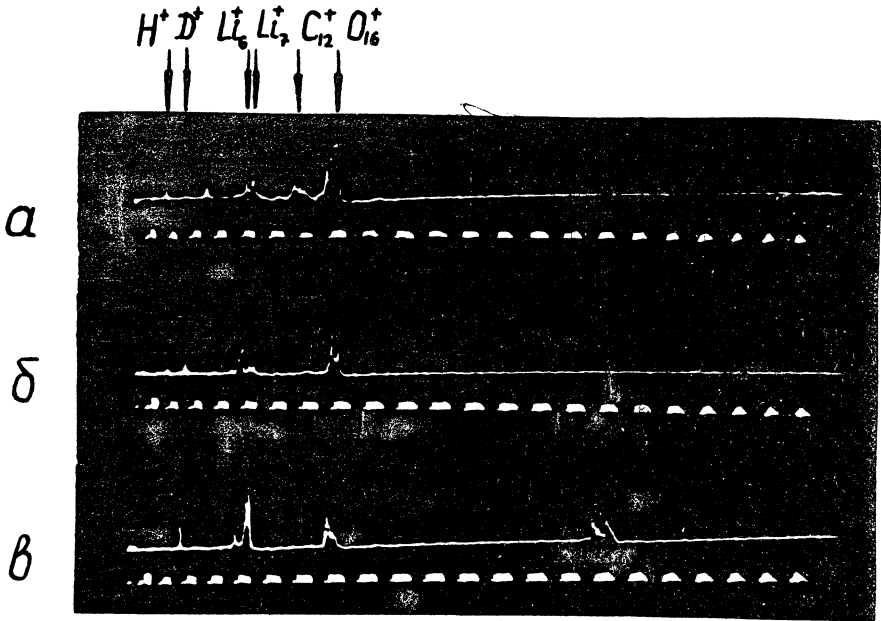


Р и с. 1. Схема времяпролетного масс-спектрометра. 1, 2, 3 - зеркала, кювета с просветляющим фильтром и рубиновый стержень ОКГ, 4 - линза, 5 - мишень, 6 - дрейфовый промежуток, 7 - анализатор, 8 - ВЭУ.

шим. В последующих вспышках наблюдалось быстрое уменьшение водородного пика и соответственное увеличение дейтериевого (рис.2 б, в).

Наличие указанных примесей частично объясняется загрязнением исходных продуктов при синтезе соединения. Кроме того, некоторое количество углерода и водорода, наблюдаемое в первых вспышках, связано с оседанием на поверхности паров масла из вакуумных на-

сосов. Небольшое количество азота может внедряться в поверхностный слой при длительном пребывании образца на воздухе.

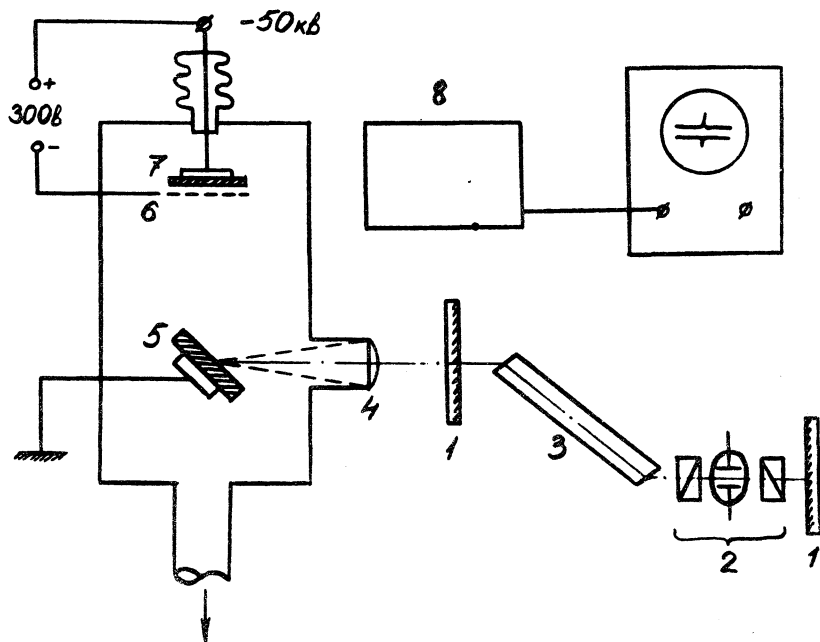


Р и с. 2. Осциллограммы масс-спектров LiD мишени, побывавшей на воздухе в течение двух дней, при фокусировке на один и тот же участок поверхности.

а, б, в- соответственно первая, вторая и третья лазерные вспышки. Метки времени - 25 мксек.

Изменение водородного и дейтериевого сигналов при фокусировании на один и тот же участок поверхности в одну и ту же точку можно объяснить тем, что в поверхностном слое произошли реакции (1) и (2). По мере углубления в образец от вспышки к вспышке в плазму переходит все более чистое вещество, т.е. происходит "лазерная чистка" поверхности. При таких ре-

жимах работы лазера, когда глубина кратера много меньше размеров фокального пятна, и, следовательно, не происходит расфокусировки, указанный метод осво-



Р и с. 3. Схема лазерного генератора нейтронов.

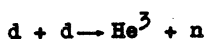
1, 2, 3 - зеркала, затвор Керра и стержень из неодимового стекла ОКГ, 4 - линза, 5 - лазерная мишень, 6 - сетка, 7 - ионная мишень, 8 - нейтронный счетчик.

бождения от поверхностных загрязнений может быть использован на практике.

Дополнительный контроль содержания дейтерия в поверхностном слое был осуществлен на лазерном генераторе нейтронов, схема которого показана на рис. 3. Лазер на неодимовом стекле давал на выходе импульс длительностью 10 нсек с энергией 0,3 дж. Модуляция добротности осуществлялась с помощью затво-

ра на ячейке Керра. Лазерное излучение фокусировалось линзой с фокусным расстоянием 100 мм на поверхность LiD . Давление внутри вакуумной камеры было $\sim 10^{-4}$ тор.

Держатель лазерной мишени заземлялся. Другая мишень из дейтерополиэтилена $(\text{CD}_2)_n$ помещалась на расстоянии 10 см от первой и поддерживалась при отрицательном потенциале, причём напряжение можно было менять от нуля до -50 кв. Образующаяся плазма вступала во взаимодействие с электрическим полем, при этом ионы дейтерия ускорялись и попадали на ионную мишень. При достаточно высоком напряжении наблюдались нейтроны, образующиеся в результате реакции:



Нейтронное излучение регистрировалось сцинтилляционным счётчиком. Сцинтиллятор на основе полистирола с добавками p -терфенила и РОРОР имел диаметр 110 мм и высоту 100 мм. Сигнал от фотоумножителя ФЭУ-52 удлинялся с помощью интегрирующей RC -цепи до 50 мксек и наблюдался на осциллографе. Запуск осциллографа осуществлялся от поджига ламп вспышек, развёртка была 100 мксек/см. Одновременно на выход осциллографа подавался импульс от затвора Керра с длительностью ~ 1 мксек.

Сигнал от нейтронного счётчика наблюдался при напряжении на ионной мишени выше 30 кв, причём импульс совпадал по времени с сигналом от затвора Керра. Оценка выхода нейтронов за импульс из сравнения с сигналом от радиоактивного источника Cs^{137} дала значение $\sim 10^4$. При одних и тех же условиях (напряжение на ионной мишени, энергия лазерного импульса) нейтронный выход менялся от вспышки к вспышке. С мишенью, в течение длительного времени (10 дней) пробывшей на воздухе, нейтроны не наблюдались вовсе. Следует заметить, что в первых экспериментах с нейтронным генератором во время лазерной вспыш-

ки в вакуумной камере развивался разряд между двумя мишенями, который удалось устранить введением сетки перед ионной мишенью. На эту сетку подавалось напряжение – 300 в относительно ионной мишени.

Эксперименты с лазерным генератором нейтронов подтвердили выводы масс-спектрометрического анализа. Из полученных результатов видно, насколько важно при лазерном нагреве соблюдать условия для предотвращения загрязнения мишени. Выполнение таких условий и помогло получить нейтронную генерацию из плазмы при фокусировании на поверхность LiD мощных ультракоротких лазерных импульсов³.

Описанные выше методы анализа применимы не только к LiD , но и к другим соединениям, содержащим дейтерий. Кроме того, лазерный генератор нейтронов при увеличении площади ионной мишени может быть превращён в удобный источник мощных нейтронных импульсов. Времяпролетный масс-спектрометр можно использовать для электрического и зарядного анализа ионов в плазме, создаваемой лазером⁴. Аналогичный прибор предполагается применить для исследования многозарядных ионов в плазме, образованной ультракороткими лазерными импульсами.

В заключение авторы выражают глубокую благодарность академику Н. Г. Басову за постановку настоящей работы и интерес в ходе её выполнения, а также Ю. А. Быковскому за обсуждение, Ю. В. Сенатскому и А. Р. Зарицкому за помощь в экспериментах.

Поступила в редакцию
11 марта 1970 г.

Л и т е р а т у р а

1. Basov N.G., Kriukov P.G., Zakharov S.D., Senatsky Yu. V. and Tchekalin S.V. IEEE J. of Quant. Electr., QE-4, 864 (1968).
2. Быковский Ю. А., Дорофеев В. И., Дымович В. И., Николаев Б. И., Рыжих С. В., Сильнов С. М. ЖТФ, XXXУШ, в. 7, 1195 (1968).
3. Басов Н. Г., Захаров С. Д., Крюков П. Г., Сенатский Ю. В., Чекалин С. В., Письма ЖЭТФ, 8, в. 1, 26 (1968).
4. Langer P., Tonon G., Floux F., Ducauze A., IEEE J. of Quant. Electr., QE-2, N9, 499 (1966).