

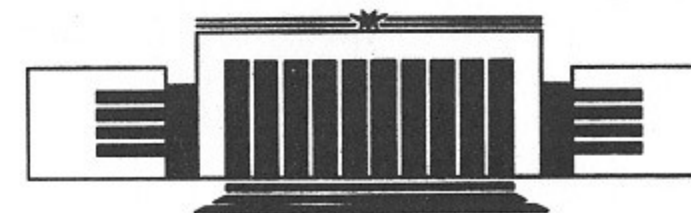


ИНСТИТУТ ЯДЕРНОЙ ФИЗИКИ
им. Г.И. Будкера СО РАН

Л.М. Горбач, О.И. Мешков, М.Г. Федотов

ВНУТРИРЕЗОНАТОРНЫЙ ЛАЗЕРНЫЙ
СПЕКТРОМЕТР ДЛЯ ДИАГНОСТИКИ
ПЛАЗМЫ

ИЯФ 94-86



НОВОСИБИРСК
1994

Внутрирезонаторный лазерный спектрометр для диагностики плазмы.

Л.М. Горбач, О. И. Мешков, М. Г. Федотов

*Институт ядерной физики
им. Г. И. Будкера СО РАН*

Аннотация

Внутрирезонаторный лазерный спектрометр на основе лазера на красителе с ламповой накачкой и линейного ПЗС в качестве фоторегистратора применен для исследования профилей спектральных линий в плазме. Прибор имеет 1024 регистрирующих канала и спектральное разрешение 0.007 нм.

© Институт ядерной физики СО РАН

Введение

При решении многих задач диагностики плазмы возникает необходимость детального изучения спектрального интервала порядка нескольких ангстрем с относительным разрешением лучше 0.1. При этом стремление увеличить число регистрирующих каналов, приходящихся на исследуемый отрезок спектра, вступает в противоречие с уменьшением количества света, попадающего в каждый из них. Этого недостатка лишен метод внутрирезонаторной лазерной спектроскопии (ВРЛ-спектроскопии) [1], в котором анализируется участок спектра излучения лазера, что снимает практически любые ограничения на световой поток, попадающий в регистрирующую аппаратуру. Характерной особенностью метода является так называемый "эффект спектральной памяти"[2], дающий возможность использовать фоторегистраторы типа ПЗС-линеек, не обладающие высоким временным разрешением, для исследования процессов длительностью в десятки наносекунд. ВРЛ спектрометр позволяет измерять величину I_v/I_0 , аналогичную коэффициенту пропускания в абсорбционной спектроскопии.

$$\frac{I_v}{I_0} = \frac{\int_0^{\tau} J_v(t) dt}{\int_0^{\tau} J_0(t) dt} \quad J_v(t) = J_0(t) * \exp(-\kappa_v * l * \frac{c * t}{L}) \quad (1)$$

Здесь J_v , J_0 - интенсивности мод генерации лазера внутри и вне линии поглощения, τ - длительность импульса лазера, l - толщина поглощающего слоя, L - длина резонатора, κ_v - коэффициент поглощения.

Форма контура поглощения $f(\nu) = \kappa_\nu / \kappa_0$ (κ_0 - коэффициент поглощения в центре линии) зависит от конкретных

экспериментальных условий.

Схема диагностики

На установке ГОЛ-М [3] проводятся эксперименты по исследованию турбулентности, возникающей при взаимодействии сильноточного релятивистского электронного пучка (РЭП) с плазмой. Можно оценить величину высокочастотных электрических полей, анализируя изменение профиля таких спектральных линий как H_{α} и H_{β} во время инжекции РЭП. Для этих целей нами применяется внутрирезонаторный лазерный спектрометр, построенный по следующей схеме (рис.1):

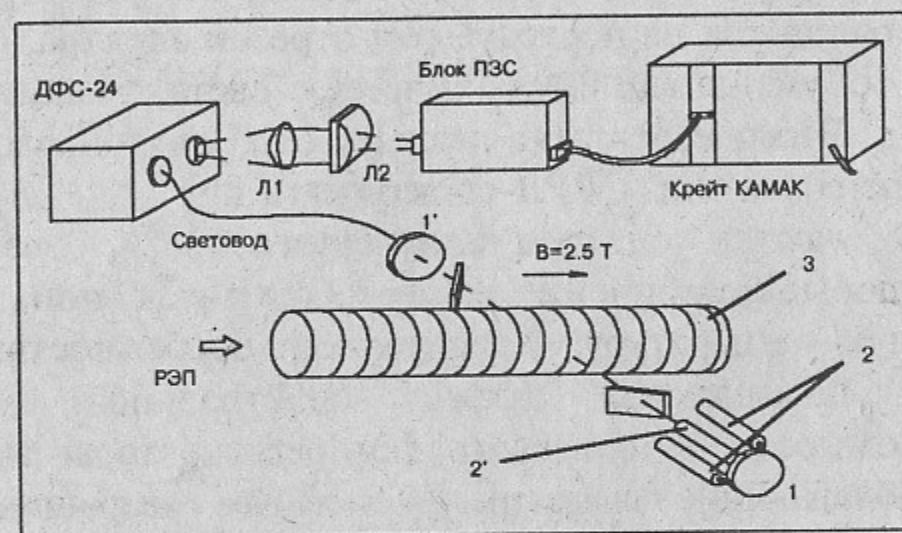


Рис. 1. Схема спектрометра. Резонатор лазера образован зеркалами 1, 1'. Исследуемая плазма 3 находится внутри резонатора. 2, 2'- лампы накачки и кювета с красителем. Обратная линейная дисперсия монохроматора ДФС-24 равна 0.45 нм/мм при относительном отверстии 1:5. Спектр излучения лазера строится линзами Л1, Л2 на ПЗС.

Резонатор лазера на растворе органических красителей родамин-6Ж и оксазин-17 (в пропорции 1:5) в пропанолу образован глухим сферическим зеркалом с $R=2000$ мм и плоским зеркалом с коэффициентом отражения 80%. Кювета с красителем накачивается двумя импульсными лампами ИФП-2000. Длительность импульса генерации лазера по полувысоте составляет около двух микросекунд, форма импульса контролируется ФЭУ, для чего часть света с помощью световода отводится в экран-комнату установки (на рисунке не показана). Спектр излучения имеет полуширину около 3 нм вблизи $\lambda=6563$ Å. Исследуемая

плазма находится внутри резонатора лазера. Диаметр плазменного столба равен 6 см, а диаметр РЭП в плазме около 2 см. Окна, отделяющие разрядную камеру от атмосферы, установлены под углом Брюстера так, что $E//V$. Длительность генерации РЭП составляет около 100 нсек, импульс лазера синхронизируется с РЭП таким образом, чтобы момент инжекции РЭП в плазму пришелся на начало генерации. Излучение лазера линзой Л1 фокусируется на торец кварцевого световода диаметром 1 мм и длиной 20 м и заводится на входную щель монохроматора ДФС-24. Изображение выходной щели монохроматора линзами Л1 и Л2 с увеличением в 2.5 раза строится на линейном ПЗС 1200ЦЛ1 [4]. Линза Л2-цилиндрическая, что позволяет частично скомпенсировать астигматизм ДФС-24.

Устройство управления ПЗС состоит из КАМАК-модуля и связанного с ним выносного блока фотоприемника. Модуль содержит КАМАК-интерфейс, таймер времени накопления, первый микропрограммный автомат и схему обработки аналогового сигнала. В выносном блоке размещены второй микропрограммный автомат, набор стабилизаторов и ключей-формирователей фаз ПЗС, малошумящий предварительный усилитель. Основной особенностью устройства является применение двух разнесенных микропрограммных автоматов, что позволило не только резко сократить число связей модуль КАМАК - выносной блок, но и реализовать три дополнительных (не паспортных) режима тактирования 1200ЦЛ1. При этом возможно управление накоплением по затвору антиблужинга и/или использование ячеек сдвигового регистра ПЗС для накопления сигнальных зарядов. Первое обеспечивает малые (меньше времени считывания ПЗС) времена накопления, второе увеличивает динамический диапазон устройства (до 3-5 тысяч по среднеквадратичному шуму в режиме "не пустого нуля"). Время считывания изображения 10 ms, задаваемый внутренним таймером диапазон времени накопления 100 ms - 28 s., выходные сигналы устройства согласованы с регистраторами формы импульсных сигналов серии "S" (АЦП-101S [5], АЦП-122S). Нами измерены некоторые, не нормируемые изготовителем, параметры ПЗС: среднеквадратичный шумовой заряд ячейки 200-300 носителей, заряд насыщения - порядка 1.5 млн. носителей, пороговая чувствительность на длине волны $\lambda = 7000$ нм около 3000 квантов/ячейка (все данные - для режима "не пустого нуля"). Приведенная к выходу устройства крутизна

преобразования заряда оценена в 6 mV/носитель.

В системе регистрации спектрометра ПЗС размещен вместе с выносным блоком на монохроматоре; крейт с модулем управления, АЦП122S и крейт-контроллером КО606 располагается на установке в специальном экран-ящике. Для управления системой и предварительной обработки спектров используется микро-ЭВМ "Электроника-60", связанная с крейт-контроллером одним коаксиальным кабелем с двойным экранированием. Программное обеспечение спектрометра написано на языке "Фортран-4".

Экспериментальные результаты

На рис 2а показан спектр излучения лазера, зарегистрированный ПЗС, в котором видны линии поглощения углерода СII 6578.05 Å и 6582.88 Å, присутствующего в водородной плазме в качестве примеси. Линия 6582.88 расщеплена за счет эффекта Зеемана в магнитном поле 25 кГс.

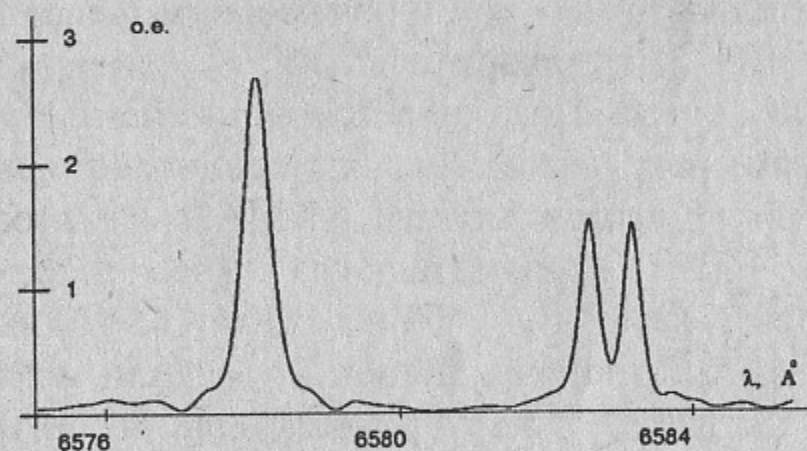


Рис 2а. Линии углерода СII 6578.05 Å и 6582.88 Å, зарегистрированные спектрометром.

Хорошая воспроизводимость (около 5%) формы спектра излучения лазера в спектральном диапазоне 9 Å, выделяемом монохроматором, позволяет использовать импульсы без плазмы в резонаторе для калибровки спектрометра. Таким образом, форма контура поглощения определяется отношением спектра, зарегистрированного в присутствии плазмы в резонаторе лазера к спектру, полученному с "пустым" резонатором. Некоторая "зашумленность" ВРЛС-граммы, связанная с разбросом чувствительности каналов и собственными шумами ПЗС и лазера

(рис. 2б) устранялась фильтрацией зарегистрированного спектра с помощью прямого и обратного Фурье-преобразования.

Линии углерода зарегистрированы во время экспериментов с предплазмой, т.е. в условиях, когда характерная длительность процесса много больше времени генерации лазера (время жизни предплазмы порядка 150 мксек). Поэтому для определения формы линий можно использовать формулу (1). Сигнал в одной ячейке ПЗС с учетом калибровки и в предположении что форма импульса лазера близка к прямоугольной очевидно равен:

$$I_V = (1 - \exp(-\kappa_V)) / \kappa_V$$

Окончательно форма спектра поглощения определялась численным решением уравнения (2) для каждой ячейки ПЗС. Эта процедура занимает менее 10 сек на РС 286-АТ.

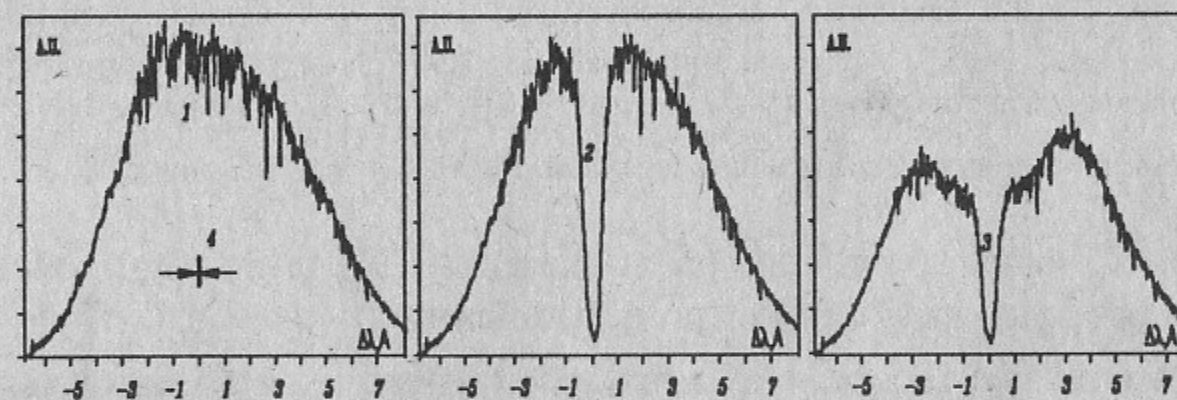


Рис. 2б. Спектр излучения лазера в окрестности линии H_α в отсутствии плазмы в резонаторе (1), с предплазмой внутри резонатора (2) и при инъекции РЭП (3). 4- спектральное разрешение

На рис 2б. представлены спектры излучения лазера в окрестности линии H_α, зарегистрированные ПЗС в отсутствии плазмы в резонаторе (1), с предплазмой внутри резонатора (2) и при инъекции РЭП (3). В последнем случае контур линии состоит из двух частей: узкий центральный пик образуется в холодной предплазме, а широкие крылья возникают под воздействием турбулентных электрических полей в области, занятой пучком. Зарегистрировать их появление позволяет уже упоминавшийся выше эффект спектральной памяти. Это явление иллюстрирует рис. 3.

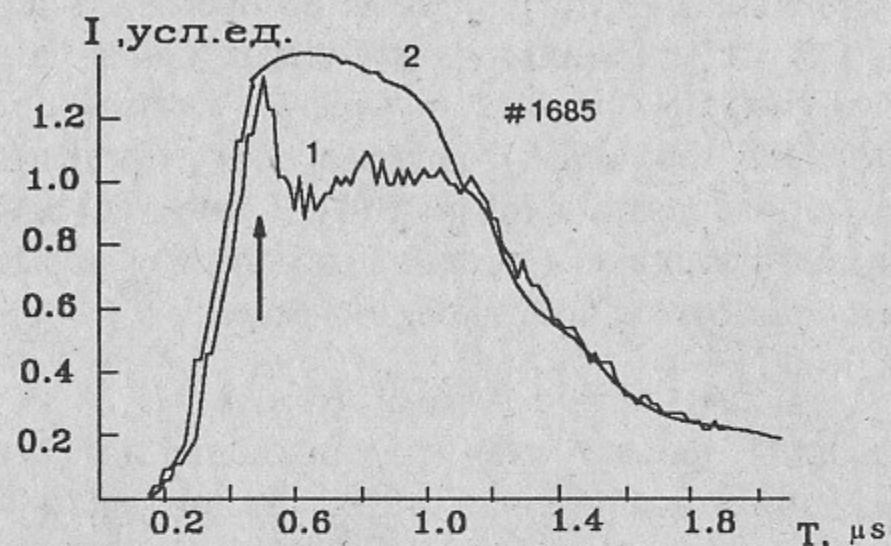


Рис.3 Изменения в спектре лазерного излучения, вызванные инъекцией РЭП. 1,2- зарегистрированные ФЭУ сигналы из спектральных каналов, расположенных на расстоянии 1.2 \AA и 5.6 \AA от центра линии H_{α} . Момент инъекции РЭП отмечен стрелкой. Длительность РЭП около 100 нсек.

"С точки зрения лазера" инъекция РЭП в плазму проявляется в увеличении коэффициента поглощения в крыльях линии H_{α} . При этом характерное время процесса много меньше длительности импульса лазера. Уширение H_{α} существует только во время инъекции РЭП, однако вызванное им изменение спектра излучения сохраняется на протяжении всей длительности генерации лазера. На рис. 3 представлены зарегистрированные ФЭУ [6] сигналы в двух спектральных интервалах шириной 0.8 \AA каждый, удаленных на 1.6 \AA (1) и 5.6 \AA (2) от центра H_{α} . В канале 1 в момент инъекции РЭП появляется поглощение, связанное с уширением линии. Канал 2 расположен на крыле линии и в нем дополнительного поглощения не возникает. Как видно, изменения в спектре излучения лазера, связанные с инъекцией РЭП в плазму, сохраняются и после выключения пучка. В этом случае сигнал в отдельном спектральном канале $I_{\nu} \propto \exp(-\kappa_{\nu})$. Разумеется, необходимо, чтобы задержка между моментом инъекции РЭП и началом генерации лазера была минимальной.

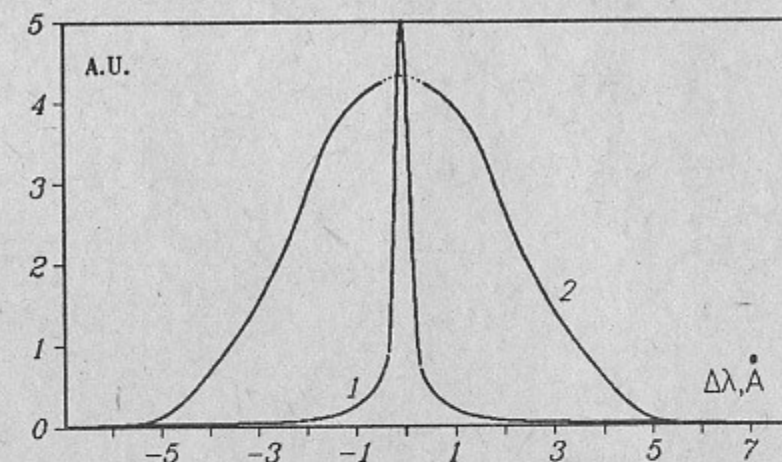


Рис. 4. Результат обработки данных рис 26. 1 - линия H_{α} в предплазме, 2- уширение линии в результате инъекции РЭП.

Результат обработки спектров поглощения, представленных на рис. 26 показан на рис 4. Центральная часть контура (2) искажается из-за поглощения в холодной предплазме.

Литература

1. Р.А. Ахмеджанов, Т.П. Данилова, О.В. Капканщиков и др. О погрешностях измерений параметров плазмы методами ВРЛ спектроскопии.- Препринт ИПФ АН СССР - 158, Горький, 1986.
2. Беликова Т.П., Свириденков Э.А., Сучков А.Ф. Исследование слабых линий поглощения и усиления некоторых газов методом селективных потерь в резонаторе ОКГ.- Квантовая электроника, 1974, т.1, с.830.
3. Proceedings of the 8th International Conference on High-Power Particle Beams. v.1, p.233, July 2-5,1990, Novosibirsk, USSR.
4. Кашлаков И.Д., Кленов В.Т, Костюков В. Е. "Электронная промышленность", 1982, 7, вып.113, стр.7.
5. Батраков А.М, Козак В. Р. Препринт ИЯФ СОАН СССР 85-9, Новосибирск, 1985.
6. Л.Н. Вячеславов, Л.М. Горбач, И.В. Кандауров и др. Физика плазмы, т. 20, вып.1, 1994, стр. 51-54.

Л.М. Горбач, О.И. Мешков, М.Г. Федотов

**Внутрирезонаторный лазерный спектрометр
для диагностики плазмы**

Ответственный за выпуск С.Г. Попов
Работа поступила 20 октября 1994 г.

Сдано в набор 26 октября 1994 г.

Подписано в печать 27 октября 1994 г.

Формат бумаги 60×90 1/16 Объем 0.8 печ.л., 0.7 уч.-изд.л.

Тираж 200 экз. Бесплатно. Заказ № 86

Обработано на IBM PC и отпечатано на
ротапринте ИЯФ им. Г.И. Будкера СО РАН,
Новосибирск, 630090, пр. академика Лаврентьева, 11.