

## ИНТЕРФЕРЕНЦИОННО-ТЕНЕВАЯ ДИАГНОСТИКА ПЛАЗМЕННЫХ ПОТОКОВ С ЦИФРОВОЙ ОБРАБОТКОЙ ИЗОБРАЖЕНИЙ

С.И.АНАНИН, В.М.АСТАШИНСКИЙ, Е.А.КОСТЮКЕВИЧ,  
А.А.МАНЬКОВСКИЙ

Институт молекулярной и атомной физики НАН Беларуси,  
проспект Ф.Скарыны, 70, Минск, 220072, Беларусь

**Резюме.** Представлен обзор исследований импульсной и стационарной плазмы, выполненных с применением методов визуализации оптических неоднородностей.

### 1. ВВЕДЕНИЕ

В арсенале диагностических средств, нашедших применение в изучении плазмодинамических процессов, заметное место занимают методы визуализации оптических неоднородностей, основанные на измерении рефракции плазмы, зная которую, можно рассчитать значения  $N_e$  с точностью, не доступной другим методам (Грим, 1969). Наиболее универсальным в этом отношении является интерференционный метод благодаря возможности менять в широких пределах его чувствительность и однозначности трактовки получаемых данных. Вместе с тем его реализация достаточно трудна, что объясняется в первую очередь сложностью схемы стандартных приборов. Громоздкость интерферометра служит причиной повышенной восприимчивости прибора к вибрациям и затрудняет его размещение на установке. Колебания зеркал хотя и не мешают регистрации интерферограмм с высоким временным разрешением, но без принятия дополнительных мер не позволяют юстировать прибор. Для преодоления этого неудобства стандартные приборы строят на массивных основаниях с применением виброзащитных развязок. В итоге, например, интерферометр ИТ-42 с полем зрения 225 мм имеет габариты 3х3х1 м при массе около 3 тонн.

Положение значительно осложняется при исследовании процессов в крупных вакуумных камерах. Здесь, как правило, возникают новые, не менее серьезные проблемы. Прежде всего, в случае расположения зеркал прибора снаружи камеры ее смотровые окна по качеству и точности изготовления должны быть сравнимы с самими зеркалами. Далее, при откачке камеры смотровые окна деформируются, внося сильные искажения в поле интерференции, для устранения которых требуется изготовление компенсационных пластин. Альтернативный вариант с размещением зеркал внутри камеры снижает остроту проблемы смотровых окон, но существенно осложняет процедуру юстировки прибора за счет необходимости каж-

дый раз производить разгерметизацию камеры. Наконец, нельзя не упомянуть и о том, что обработка интерферограмм достаточно сложна и отнимает немало времени. Все эти факторы сдерживают распространение метода оптической интерферометрии в диагностике плазмы.

Ниже представлен краткий обзор работ, выполненных с применением автоколлимационного интерферометра (Костюкевич и Минько, 1981), конструктивные особенности которого упрощают реализацию метода. Прибор состоит из источника света, коллиматора, светоделиителя и двух полупрозрачных зеркал, отражающих опорный и предметный пучки. Светоделиитель направляет их в съемочную камеру, где наблюдается результат их интерференции в виде системы параллельных полос, частота и ориентация которых задается поворотами одного из зеркал. За счет одноосности схемы и использования принципа автоколлимирования прибор отличается компактностью и легко монтируется практически на любой установке. Так, габариты самого крупного из применявшихся в экспериментах интерферометра с полем зрения 200 мм составляли всего 80x40x40 см.

Покадровая съемка интерферограмм с частотой до 250000 кадр/с проводилась фоторегистратором СФР. Использувавшиеся для зондирования плазмы лазеры на рубине и неодиме, работавшие в режиме свободной генерации с селекцией мод, обеспечивали временное разрешение не хуже 100 нс при частоте съемки до 250000 кадр/с.

Для обработки интерферограмм была создана автоматизированная система (Ананин и др., 1994), в состав которой входят видеокамера на ПЗС-матрице, блок управления, монитор и компьютер. На видеокамеру записывается нужный кадр киноинтерферограммы. Блок управления оцифровывает сигналы с матрицы, запоминает изображение, выводит его на монитор и обеспечивает выполнение операций ввода-вывода.

Программа обработки интерферограмм, создававшаяся с учетом особенностей эксперимента, включает процедуру автоматизированного поиска максимумов интерференционных полос в заданных сечениях, интерактивную коррекцию полученной матрицы и последующие машинные вычисления, дающие в итоге распределение  $N_e$  в визуализируемой области.

## II. ЭКСПЕРИМЕНТ

### 1. Взаимодействие лазерного излучения с веществом

Анализ киноинтерферограмм воздействия сфокусированного излучения Nd-лазера в пиковом режиме на алюминиевую мишень (Костюкевич и др., 1980) позволил проследить динамику развития лазерного факела и выявить характер распространения ударных волн. При их взаимодействии в надфакельной области образуется плотная воздушная «пробка», которая

может существенно влиять на процесс взаимодействия лазерного излучения с собственной плазмой. Применение интерферометрии на двух длинах волн позволило найти распределение  $N_e$ , максимальное значение которой составило  $2 \times 10^{18} \text{ см}^{-3}$ . При воздействии на мишень 1-мкс импульсом высокое временное разрешение достигалось за счет щелевой развертки полюс. В результате измерены скорости ударных фронтов и найден временной ход  $N_e$  на оси факела.

## 2. Дуговой плазмотрон

При исследованиях стабилизирующего действия электрической дуги на течение плазмы в канале стационарного дугового плазмотрона со стержневым катодом и трубчатым анодом (Алешин и др., 1983) окна смотровой секции были заменены зеркалами интерферометра (диаметром 10 мм), крепившимися к фланцам через эластичные уплотнения, обеспечивавшие герметичность канала и возможность юстировки прибора. В результате были установлены факторы, определяющие переход режима течения от турбулентного к ламинарному.

## 3. МПК и КСПУ

Магнитоплазменный компрессор (МПК) представляет собой электро-разрядную систему, содержащую разрядное устройство с коаксиально расположенными электродами, которая позволяет получать импульсные плазменные потоки, сжатые собственным магнитным полем (Асташинский и др., 1991).

Четыре таких устройства используются в принципиально новой двух-ступенчатой системе - квазистационарном сильноточном плазменном ускорителе (КСПУ) - в качестве первой ступени. Они инжектируют полностью ионизированные плазменные потоки во вторую ступень - ускорительный канал, образованный внешним электродом длиной 120 см и диаметром 50 см и центральным электродом сложного профиля. Таким образом, разряд второй ступени происходит в предварительно разогретой среде, чем обеспечивается достижение высоких параметров на выходе ускорителя.

Чтобы исключить влияние деформаций смотровых окон, зеркала 200-мм интерферометра жестко крепились изнутри камеры к оправам окон. Специальная конструкция оправ окон позволяла юстировать зеркала снаружи, не прибегая к разгерметизации камеры. Кроме того, жесткая связь зеркал со стенками вакуумной камеры обеспечивала надежную защиту от вибраций: юстировка прибора не нарушалась даже после продолжительной работы вакуумных агрегатов.

Предварительные расчеты показали, что в условиях МПК и КСПУ рефракция плазмы в области компрессии определяется главным образом

свободными электронами, а вклад тяжелых частиц не превышает погрешности измерений. Это давало возможность определять  $N_e$  по однодлинноволновым интерферограммам.

$T_e$  в области компрессии КСПУ определяли по скорости звука в плазме, которая однозначно связана с углом отхождения скачка уплотнения, образующегося при набегании плазменного потока на тонкий клин, установленный под нулевым углом атаки. Для визуализации скачков уплотнения интерферометр был переоборудован в теневой прибор посредством замены заднего полупрозрачного зеркала глухим.

В результате проведенных экспериментов прослежена динамика формирования области компрессии в МПК и КСПУ, найдено пространственно-временное распределение  $N_e$  в потоке, обнаружено, что на стадии развала область компрессии приобретает трубчатую структуру. По значениям  $N_e$  в канале и за срезом ускорителя определена степень сжатия плазменного потока в области компрессии. На основании тенегрмм взаимодействия потока с клином рассчитаны значения  $T_e$  (Ананин и др., 1998).

### III. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Результаты проведенных исследований показали высокую гибкость и универсальность автоколлимационного интерферометра, позволяющую изменять его в самых разнообразных условиях.

#### Литература

- Грим Г.: 1969, *Спектроскопия плазмы*. Атомиздат, М., 243.
- Костюкевич Е.А., Минько Л.Я.: 1981, *Журнал прикладной спектроскопии*, 34, № 3, 551.
- С.И.Ананин, В.М.Асташинский, Е.А.Костюкевич и др.: 1994, в сб. *Физика и техника плазмы. Материалы конференции*. т.1, Минск, Беларусь, 336.
- Костюкевич Е.А., Минько Л.Я., Чумаков А.Н.: 1980, *Препринт/АН БССР. Институт физики*; № 211.
- Алешин Н.Ф., Лизунков Г.П., Костюкевич Е.А.: 1983, в сб. *Тепло- и массоперенос: экспериментальные и теоретические исследования*. Минск, ИТМО им.Львова АН БССР, 75.
- Асташинский В.М., Ефремов В.В., Костюкевич Е.А. и др.: *Физика плазмы*, 17, № 9, 1111.
- Ананин С.И., Асташинский В.М., Костюкевич Е.А. и др.: *Физика плазмы*, 1998, в печати.