

ГОСУДАРСТВЕННЫЙ КОМИТЕТ ПО ИСПОЛЬЗОВАНИЮ
АТОМНОЙ ЭНЕРГИИ СССР
НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ИНСТИТУТ
ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКОЙ АППАРАТУРЫ им. Д.В.ЕФРЕМОВА

НИИЭФА П-К-0710

А.Г.Смирнов, В.Г.Смирнов

ВИЗУАЛИЗАЦИЯ ПЛОТНОЙ ПЛАЗМЫ НА ОСНОВЕ
ДВУХЭКСПОЗИЦИОННОЙ ГОЛОГРАФИЧЕСКОЙ
ИНТЕРФЕРОМЕТРИИ

МОСКВА
ЦНИИАТОМИНФОРМ
1985

Смирнов А.Г., Смирнов В.Г. Визуализация плотной плазмы на основе двухэкспозиционной голографической интерферометрии: Препринт П-К-С710. - М.: ЦНИИатоминформ, 1985, 8 стр., с илл., цена 6 к.

Описана методика двухэкспозиционной голографической интерферометрии, обеспечивающая изучение плазмы, обладающей сильной рефракцией. Суть предлагаемой методики состоит в анализе дисперсионных и фокусирующих свойств совмещенной голограммы, рассматриваемой как двухкомпонентная оптическая система. Описана схема восстановления подобного рода голографических приборов для изучения плазмы тета-пинча и процессов, возникающих при взаимодействии излучения с плазмой.

С центральным научно-исследовательским институтом информации и технико-экономических исследований по атомной науке и технике (ЦНИИатоминформ), 1985 г.

Наибольшее распространение в диагностике высокотемпературной плазмы для визуализации оптических неоднородностей получила двухэкспозиционная голографическая интерферометрия (ДГИ) /1-3/. Свойственная этому методу абсолютная дифференциальность позволяет реализовать простой интерферометр с совмещенными плечами, с помощью которого обеспечивается получение безаберрационных интерферограмм в достаточно сложных условиях экспериментов, проводимых на термоядерных установках. Вместе с тем дифференциальное свойство совмещенных голограмм, получаемых по методу двух экспозиций, может быть использовано для создания на основе голограммы не только интерферометра, в также спектрографа и фокометра, которые позволяют расширить диапазон измеряемых величин концентрации частиц в плазме по сравнению с интерферометром, что существенно при измерении концентрации в плотной плазме, характеризующейся сильной рефракцией волны, зондирующей плазму.

Ограничения применимости интерферометра обусловлены отклонением зондирующих лучей плотной плазмы на углы $\varepsilon \sim \Delta n_e$, превосходящие $1 \cdot 10^{-3}$ рад, что приводит к появлению дополнительной разности хода и перепутыванию лучей в плоскости регистрации, выражающихся в относительных смещениях отдельных участков волнового фронта, которые не могут быть скомпенсированы из-за аберраций, обусловленных рефракцией зондирующих лучей.

В данной работе описана методика ДГИ, обеспечивающая изучение плазмы, обладающей сильной рефракцией. Суть предлагаемой методики заключается в анализе дисперсионных и фокусирующих свойств совмещенной голограммы, рассматриваемой как двухкомпонентная оптическая система (ДОС). На основе дисперсионной ДОС схема восстановления выполняется в виде дифференциального спектрографа и дифференциального фокометра. Представлены результаты использования подобного рода голограммных приборов, а также голограммного теневого и интерференционного приборов для изучения плазмы линейного тета-пинча УТРО /4/ и плазмы, образованной при взаимодействии излучения с плазмой.

По своему действию на зондирующую волну плотная плазма в зависимости от симметрии распределения показателя преломления эквивалентна либо преломляющему клину, либо линзе. Обращаясь к рис. 1, а, поясняющему получение совмещенной голограммы по двухэкспозиционному методу, голографические параметры в случае аппроксимации плазменной неоднородности клином можно записать сле-

дующим образом.

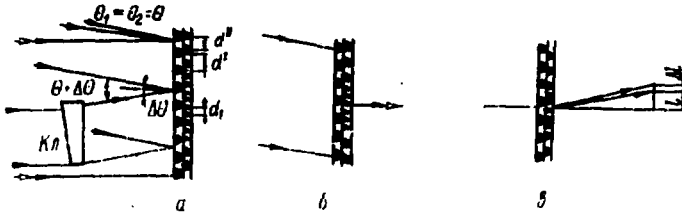


Рис. 1. Эквивалентная оптическая схема анализа дисперсионных свойств совмещенной голограммы: а - получение совмещенной голограммы двухэкспозиционным методом; б, в - восстановление совмещенной голограммы источником белого света (б), монохроматическим источником света (в). Обозначение: \rightarrow соответствует ходу лучей в первой и второй экспозициях

Период штрихов голограммных решеток в невозмущенной части поля $d^1 \approx d'' = d = \lambda / \sin \theta$, соответственно в возмущенной части поля $d_1 = \lambda / \sin(\theta + \Delta\theta)$. Здесь θ - угол между опорным и объективным пучками; $\Delta\theta$ - угол преломления впазенного клина; λ - длина волны излучения записывающего источника. Освещая такую ДЭС из голограммных решеток коллимированным пучком полихроматического света (рис. 1, б), в направлении распространения главной восстановленной волны два пучка излучения будут идти с разными длинами волн. Один луч соответствует голограммной решетке сравнения, второй - впазенной решетке.

Согласно уравнению дифракционной решетки $(\sin \alpha - \sin \theta)d = \lambda$ и полагая, что угол дифракции $\alpha = 0$, можно записать $\lambda_1 = d_1 \sin \theta$ и $\lambda_2 = d \sin \theta$, откуда $\Delta \lambda = (\lambda_2^0 - \lambda_1^0) = (d - d_1) \sin \theta$. Так как $\lambda_3 = d \sin \theta_0 = d_1 \sin \theta_1 = d_1 \sin(\theta + \Delta\theta)$, то полагая, что $\theta \gg \Delta\theta$, можно выражение для угла преломления записать в следующем виде:

$$\Delta\theta \approx \frac{\Delta\lambda}{(\lambda_3 - \Delta\lambda)} \operatorname{tg} \theta.$$

При использовании лазера в качестве восстанавливающего источника (рис. 1, в) получаем

$$\Delta\theta \approx \frac{\Delta l}{l} \operatorname{tg} \theta.$$

Эти выражения связывают голографические параметры схемы восстановления $(\Delta\lambda; \Delta l; l)$ с параметрами голографической схе-

мы ($\lambda_0; \theta$ и $\Delta\theta$) и позволяют определить величину угла преломления плазменного клина.

В случае аппроксимации прозрачной неоднородности плазмы линзой голографическую схему можно представить в следующем виде (см. рис. 2,а).

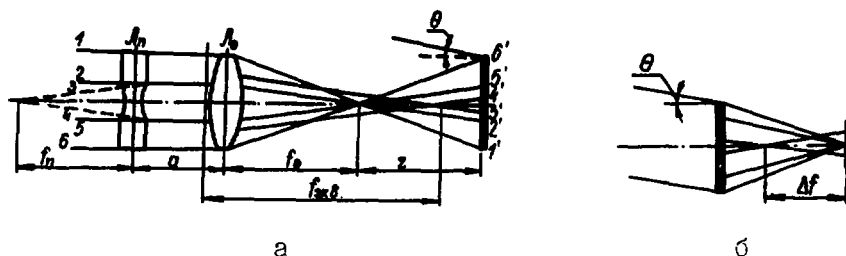


Рис. 2. Эквивалентная оптическая схема анализа фокусирующих свойств совмещенной голограммы: получение (а) и восстановление (б) голограммы сфокусированного изображения (дифференциальный фокометр)

Здесь L_n обозначает плазменную линзу с фокусным расстоянием f_n ; L_0 — объектив приемной части системы регистрации голографической схемы; f_0 — фокусное расстояние; α — расстояние между главными плоскостями линз L_n и L_0 . Заштрихованными участками на голограмме обозначены области, на которых записаны совмещенные голограммы, представляющие собой голограммные ДЭС, а участки, свободные от штриховки, соответствуют линзе приемного объектива L_0 .

При освещении восстанавливающим источником (см. рис. 2,б) такая голограмма построит в действительном пространстве изображение двух источников: одного, соответствующего объективу L_0 а другого — ДЭС, образованной линзой L_n и объективом L_0 . Расстояние между этими изображениями Δf вдоль оптической оси есть разность между фокусными расстояниями f_0 и $f_{дэс}$. Определив это расстояние экспериментальным путем и используя формулу для определения $f_{дэс}$, выражение для f_n можно записать в следующем виде [5]:

$$\frac{(f_0 - \alpha)f_{дэс}}{f_0 - f_{дэс}} = \frac{(f_0 - \alpha)(f_0 + \Delta f)}{|\Delta f|}.$$

Это выражение связывает голографические параметры f_0 , f_n, α голографической схемы с параметром Δf схемы восста-

новления. Непосредственно измеряемой величиной является Δf -разность между фокусными расстояниями объективов \mathcal{L}_0 и ДЭС. В силу отсутствия необходимости определения положения главной плоскости ДЭС упрощается процедура измерения и увеличивается одновременно точность измерения f_n . Подобная схема восстановления, представляющая собой дифференциальный фокометр, не требует для своего осуществления других оптических приборов и средств по сравнению со схемами восстановления, приведенными на рис. 3.

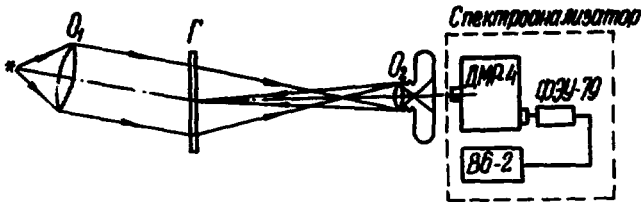


Рис. 3. Оптическая схема дифференциального спектрографа на основе ДЭС:
 I - источник белого света; O_1 , O_2 - оптическая система; ДМР-4 - двойной монохроматор; ВВ-2 - селективный вольтметр

Дисперсионные свойства составных голограмм изучаются с помощью схемы восстановления (см. рис. 3).

Параметры оптической системы - элементы O_1 и O_2 , их взаимное расположение выбиралось таким образом, чтобы на входном луче объектива O_2 формировалось изображение источника, окрашенное во все цвета спектра, а в плоскости входной щели монохроматора получалось резкое изображение плоскости голограммы, также окрашенное во все цвета спектра. Визуализирующая диафрагма в оптической системе $O_1 O_2$ не устанавливалась. Сравнивая дисперсионные зависимости и принимая дисперсионную зависимость участка голограммы, соответствующего невозмущенному полю, в качестве аппаратной функции, можно $\Delta \lambda$ определять как сдвиг между этими зависимостями.

Другим методом измерения углов отклонения пучка плазменной неоднородностью зарегистрированной на совмещенной голограмме, является теневой метод [6]. На рис. 4, а приведена схема восстановления на основе этого метода.

Измерение углов отклонения пучка неоднородностью осуществ-

влялось следующим образом. В нулевом положении ножа Фуко путем осциллографирования (см. рис. 4, б) измерялся уровень освещенности A_0 на фотокатоде ТПК, соответствующий невозмущенному полю, и уровень освещенности A , обусловленный неоднородностью. Затем перемещением ножа Фуко устанавливалось равенство $A=A_0$. Величина перемещения Δ ножа Фуко в данном случае связана с углом ϵ простым соотношением $\epsilon = \Delta/f$, где f - фокусное расстояние голограммной линзы.

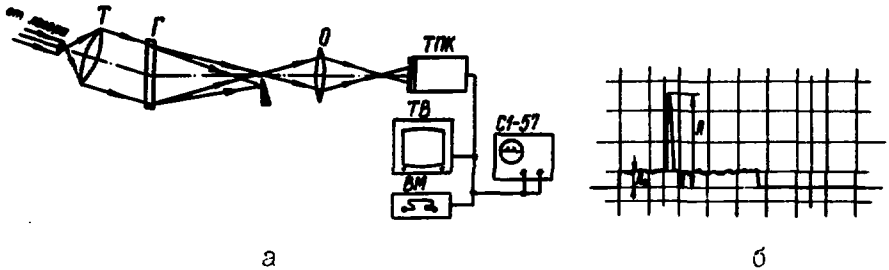


Рис. 4. Оптическая схема теневого прибора на основе совмещенной голограммы сфокусированного изображения:
 а - схема восстановления: Т - коллиматор; Г - голограмма; Ф - нож Фуко; О - объектив телевизионной передающей камеры (ТПК); ТВ - монитор ТПК; ВМ - видеоманитон; СИ-57 - осциллограф с блоком выделения строки телевизионной развертки; б - осциллограмма распределения интенсивности излучения вдоль строки в восстановленной тенеграмме, полученной путем выделения строки с помощью осциллографа

Точность измерения углов отклонения с помощью данной схемы теневого прибора при оптической обработке двумерной двухэкспозиционной совмещенной голограммы (ДСГ) может быть доведена до величины, определяемой aberrациями системы формирования объектного пучка и неравномерного распределения освещенности теневой картины, обусловленной голографическим процессом. Дальнейшее повышение точности измерения углов отклонения лежит на пути использования дифференциальных свойств трехмерной ДСГ. Суть этих свойств заключается в том, что если в качестве общей ветви голографической схемы (см. рис. 5) используется предметное плечо голографической теневой системы, а в качестве двух других ветвей - система из двух одинаковых опорных пучков, в такой голографической схеме при выполнении условия образования трехмерной голограммы

$$\theta = \theta \gg \arcsin \left(\frac{\lambda_3}{2n\sqrt{2\pi/5} \cdot \lambda_3 \Delta / m'} \right),$$

где n - показатель преломления светочувствительного слоя, а Δ - его толщина [7], реализуются требования, при выполнении которых образуется система из двух взаимосвязанных голограмм [8].

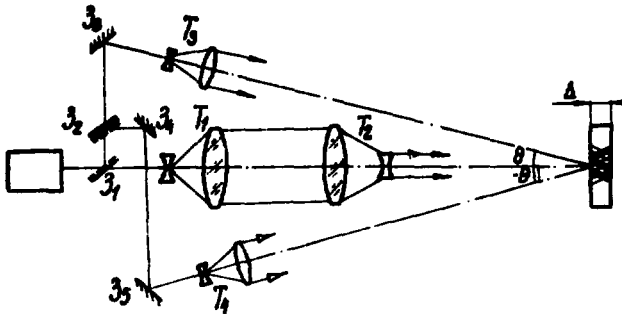


Рис. 5. Голографическая схема дифференциального теневого прибора на основе трехмерной ДСР:
И - лазерный источник; Z_1, T_1, T_2 - элементы объектной ветви; $Z_2, Z_3, T_3 - Z_2, Z_4; Z_5, T_4$ - элементы опорных ветвей;
—→; - -→ обозначает ход лучей в первой и второй экспозициях соответственно

При освещении такой трехмерной ДСР одним из опорных пучков (см. рис. 6) восстановится соответствующий ему объектный пучок, в свою очередь восстанавливающий другой опорный пучок, т.е. такая система будет по своему действию аналогична дей-

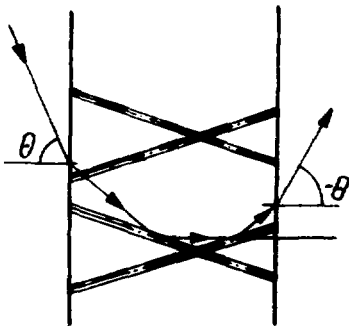


Рис. 6. Ход восстановленных лучей в системе взаимосвязанных голограмм

ствие голографических теневого спектра с компенсацией aberrаций путем переноса информации с объектного пучка на опорный [7]. Качество восстановленного опорного пучка будет определяться степенью идентичности штрихов голограммных решеток. Если в общей ветви объектная волна в обеих экспозициях проходила в отсутствие неоднородности, то конфигурация штрихов, естественно,

будет одинаковой. Соответственно качество восстановленного опорного пучка останется таким же, каким оно было при записи голограммы. Наличие неоднородности в одной из экспозиций вызовет искажение конфигурации штриха голограммы сигнального объектного пучка, что повлечет за собой искажение восстановленного

этого луча.

Рассмотренные выше свойства совмещенных голограмм, полученные по двухэкспозиционному методу, являются следствием фундаментального свойства голограммы - отображения свойств объекта, - поэтому перечень средств получения информации о пространственной неоднородности плазмы, несомненно, может быть продолжен.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Жода С.К. Излученная голографическая интерферометрия - в кн. Динамика плазмы. - М.: Атомиздат, 1978, вып. 1, с. 1-10.
2. Mc Kenna K.F., York T.M. End lass a collision dominated theta-pinch plasma.- The Physics of Fluids, 1977, vol.20, No.9, p.1556.
3. Шенкина Гета-пинч с сильным быстронарастающим магнитным полем /В.М.Мурцев, А.Г.Смирнов, А.Г.Смирнов и др. - Известия АН УССР, т.5, вып.6, с.1218-1219.
4. Березин А.В., Мурцев В.А., Смирнов А.Г., Смирнов В.П. Образование голографическими методами потери когерентности лазерного излучения, зондирующего плазму быстрого линейного гета-пинча. -И., 1981. - 30 с. (Препринт/ИИЭРА: В-1500).
5. Бродяева И.И., Коркина К.И. Прикладная оптика и оптические измерения. - М.: Машиностроение, 1976, с. 329-330.
6. Постепование пробоя газа перед лазерным факелом методом кольцевой голографии/И.И.Ашмерин, В.А.Быковский, И.М.Генярович и др. - ИИЭРА, 1971, т.41, с.2369-2376.
7. Кольер Р., Берхарт К., Лин А. Оптическая голография. - М.: Мир, 1973, с.294-205.
8. Case S.K. Coupled - wave theory for multiply exposed thick holographic gratings. - Journ. Opt. Soc., 1975, vol.65, No.6, p.724.
9. Голографическая интерферометрия газовых объектов /А.А.Бекетова, А.А.Гелозеров, А.В.Березкин и др. - Л.: Наука, 1979, с. 124-131.

Аркадий Григорьевич Смирнов
Владимир Григорьевич Смирнов

ВИЗУАЛИЗАЦИЯ ПЛОТНОЙ ПЛАЗМЫ НА ОСНОВЕ
ДВУХЭКСПОЗИЦИОННОЙ ГОЛОГРАФИЧЕСКОЙ
ИНТЕРФЕРОМЕТРИИ

Редактор В.Л.Гусева

Подписано в печать 11.11.85 г. Т-15475. Формат 60x90/16.
Офсетная печать. Уч.-изд. л. 0,4. Тираж 150 экз. Зак. № 145/421.
Индекс 3624. Цена 6 к.

Отпечатано в НИИЭФА