

АППАРАТНЫЙ КОНТУР НЕИДЕАЛЬНОГО ИНТЕРФЕРОМЕТРА
ФАБРИ—ПЕРОIV. АППАРАТНЫЙ КОНТУР УСТАНОВКИ С РЕАЛЬНЫМ
ИНТЕРФЕРОМЕТРОМ

*В. С. Бабаев, Л. Ф. Зацепя,
В. В. Кучинский и Э. Н. Фафурина*

Аппаратная функция интерферометрической установки как целого получена путем экспериментального исследования рельефа поверхности зеркал интерферометра Фабри—Перо, а также совместного влияния освещенности зеркал интерферометра и зонной чувствительности фотоэлектрического приемника излучения и последующего расчета аппаратного контура установки с интерферометром Фабри—Перо, выходной диафрагмой конечных размеров и инерционным фотометром. Найденный таким способом аппаратный контур стабилизированной интерферометрической установки позволил рассчитать распределение яркости в СТС линии MgI 880.7 нм со среднеквадратичным отклонением от измеренного распределения $\approx 0.5\%$.

В предыдущих работах [1-3] рассчитывался аппаратный контур неидеального интерферометра Фабри—Перо (ИФП), законы изменения свойств которого задавались директивным путем. Поэтому различие рассчитанного и наблюдаемого распределения яркости в работе [3] в 2.5 раза превышало случайную ошибку эксперимента. В данной работе аппаратная функция впервые получена на основе измерения реальных распределений характеристик интерферометрической установки.

Напомним, что экспериментальные методы определения аппаратного контура интерферометрической установки (АКИУ) обладают рядом трудноустраняемых недостатков. Основная идея этих методов обычно состоит в использовании источника света, излучающего линии, узкие по сравнению с шириной аппаратного контура. Для этого часто применяют лазер, но длины волн лазерного излучения и исследуемой спектральной линии обычно не совпадают. Поскольку величина и характер дефектов при таком измерении АКИУ остаются неизвестными, то пересчет измеренного АКИУ к действительному затруднителен. Существенно отличными являются АКИУ для когерентного и некогерентного света. Это может привести к дополнительной ошибке, если не принять меры к искусственному созданию пространственной некогерентности лазерного излучения. Но при этом не всегда легко практически осуществить одинаковую пространственную когерентность излучений лазерного и исследуемого газоразрядного источников света.

Недостаточно корректными представляются и другие способы определения АКИУ, такие, как метод [4] с использованием вспомогательных источника света и эталона Фабри—Перо и метод двух эталонов [5, 6].

Целью данной работы является изложение и проверка нового способа определения АКИУ, свободного, на наш взгляд, от недостатков предшествующих методов. Будем считать, что интерферометрическая установка состоит из ИФП, круглой выходной диафрагмы, выделяющей центральное пятно интерференционной картины, фотоэлектрического прием-

ника излучения и усилителя с конечной постоянной времени. Представим реальный ИФП в виде совокупности элементарных идеальных интерферометров [7]. Тогда аппаратный контур неидеального ИФП можно представить как сумму

$$J(\lambda) = \frac{\sum J_i(\lambda) \Phi_i \Delta S_i}{\sum \Phi_i \Delta S_i}, \quad (1)$$

где λ — длина световой волны, $J_i(\lambda)$ — аппаратная функция элементарного идеального интерферометра, ΔS_i — площадь его поверхности, Φ_i — весовая функция, пропорциональная произведению освещенности i -го интерферометра на зонную чувствительность участка фотоприемника, на который попадает излучение от i -го элементарного интерферометра. Так как излучение после ИФП фокусируется на круглую выходную диафрагму,

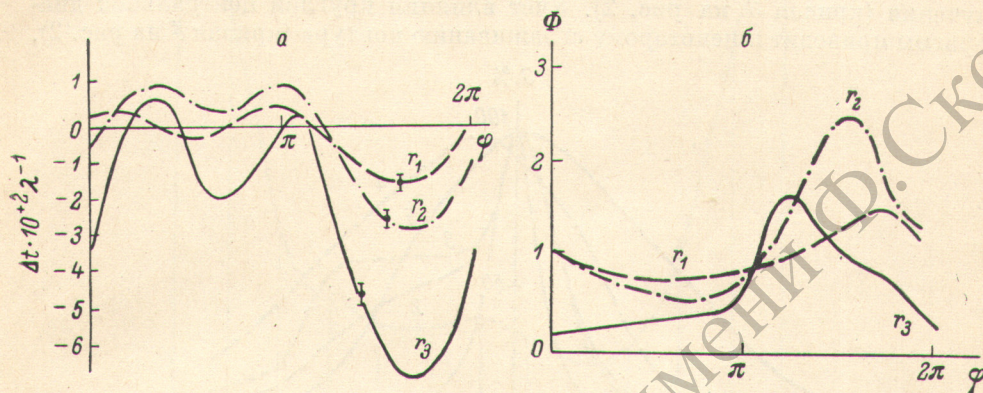


Рис. 1. Параметры интерферометрической установки.

a — изменение расстояния Δt между зеркалами ИФП относительно центра интерферометра, выраженное в долях длины волны резонансной линии Cs I 894.3 нм; r , φ — полярные координаты круглых зеркал диаметром 25 мм; $r_1=4$ мм, $r_2=8$ мм, $r_3=12$ мм; вертикальным штрихом около каждой кривой дана среднеквадратичная ошибка измерения Δt ; *б* — изменение по поверхности ИФП весовой функции Φ , нормированной на единицу в центре интерферометра.

то удобно взять $J_i(\lambda)$ в виде функции, предложенной Шаббелем в работе [8]. Инерционность регистрирующей системы можно учесть, как, например, это сделано в [9]

$$J(x) = \int_0^{+\infty} \exp(-x'/\tau) J(x-x') dx', \quad (2)$$

где аргумент x выражен в долях порядка интерференционной картины, τ — постоянная времени фотоэлектрической системы регистрации, отнесенная ко времени записи одного порядка. Для получения каждого $J_i(\lambda)$ нужно знать расстояние между зеркалами различных участков ИФП. Эти данные, а также функции Φ_i можно определить только из эксперимента.

Стабилизированная интерферометрическая установка, аппаратный контур которой определялся в этой работе, описана в работе [10].

Рельеф поверхности зеркал исследованного ИФП, измеренный описанным в работе [11] методом, представлен на рис. 1, *a*. Из этого рисунка видно, что рельеф может иметь сложный вид, аппроксимировать который обычно применяемыми простыми функциями затруднительно.

В данной работе впервые экспериментально исследовано одновременное влияние зонной чувствительности фотоэлектрического приемника излучения и неравномерной освещенности зеркал ИФП на АККУ. Для изучения влияния этих двух факторов последовательно регистрировали сигналы от различных участков ИФП, освещенного исследуемым источником излучения. Определенная таким образом весовая функция (для источника света с охлаждаемым полым катодом) представлена на рис. 1, *б*.

Из рис. 1, б видно, что функция Φ может сильно меняться по поверхности зеркал ИФП и даже не обладать осевой симметрией.

Расчитанные по результатам вышеописанных измерений с помощью формул (1) и (2) АКIU приведены на рис. 2. Можно сравнить функцию Эри, описывающую идеальный ИФП (кривая 1 на рис. 2), с аппаратным контуром неидеального ИФП, расчитанного по формуле (1) при $\Phi_0=1$ с учетом измеренного рельефа поверхности зеркал (кривая 2 на рис. 2). Сравнение показывает, что аппаратный контур неидеального ИФП несимметричен, ширина его сильно увеличивается, несколько смещается положение максимума. Таким образом, рельеф зеркал реального ИФП оказывает существенное и сложное влияние на его аппаратный контур. Значительное влияние на АКIU оказывает также неравномерная освещенность и зонная чувствительность фотоэлектрического приемника излучения (кривая 3 на рис. 2). Учет влияния круглой центральной диафрагмы приводит к некоторому сглаживанию контура (кривая 4 на рис. 2),

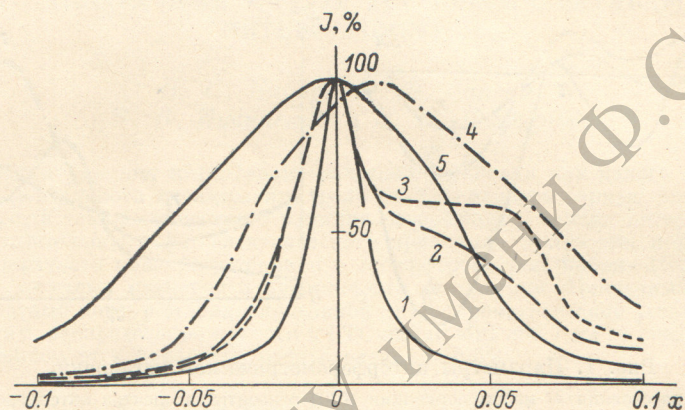


Рис. 2. Вид АКIU при воздействии на него различных факторов.

1 — представляет АКIU при применении идеального ИФП; 2 — при реальном ИФП; 3 — изображает АКIU при дополнительном одновременном влиянии на него неравномерной освещенности интерферометра и зонной чувствительности ФЭУ; 4 — дополнительно учтено влияние на АКIU выходной диафрагмы диаметром 1,6 мм со спектральной шириной 0.061 долей порядка; 5 — расчитана при одновременном влиянии на АКIU всех предыдущих факторов и инерционности системы регистрации. Все кривые нормированы на величину пропускания в максимуме.

но тем не менее АКIU остается достаточно сложным и асимметричным. Ошибка в юстировке диафрагмы в наших условиях мала. Оценка влияния качества юстировки на АКIU проводилась на основании работы [12]. Окончательный АКIU, расчитанный по формуле (2) при влиянии на него одновременно всех изученных факторов, описывается кривой 5 на рис. 2. Различие кривых 4 и 5 этого рисунка обусловлено инерционностью регистрирующей фотоэлектрической системы с постоянной времени интегрирующей цепочки фотометра, равной 1 с. Это время примерно в 20 раз меньше времени записи ширины наблюдаемого контура, однако влияние инерционности на форму АКIU значительно.

Сравнение кривых рис. 2 показывает, что вклад всех рассмотренных факторов, формирующих АКIU, значителен и соизмерим. Реальный АКIU достаточно сложен, чтобы можно было просто описать его аналитически. Задавать его приходится таблицей или графиком.

Основная случайная ошибка предлагаемого метода определения АКIU обусловлена ошибкой измерения рельефа поверхности зеркал ИФП. Суммарная случайная ошибка нашего метода определения аппаратной функции ИФП составляет 0.5%.

Проверка правильности нового метода определения АКIU заключалась в сравнении результатов расчета свертки аппаратного контура с известным собственным контуром и результатов экспериментального изучения распределения яркости в спектральной линии. На установке со стабилизированным аппаратным контуром была зарегистрирована СТС

трехкомпонентной линии MgI 880.7 нм, запись которой представлена на рис. 3, а. Известно, что собственный контур атомной линии, возбуждаемой в источнике света с полым катодом, является доплеровским, т. е. определяется газовой температурой T . Величина T находилась из условия наилучшего совпадения рассчитанного контура с экспериментальным. При расчете свертки на ЭВМ определенный нашим методом АКIU за-

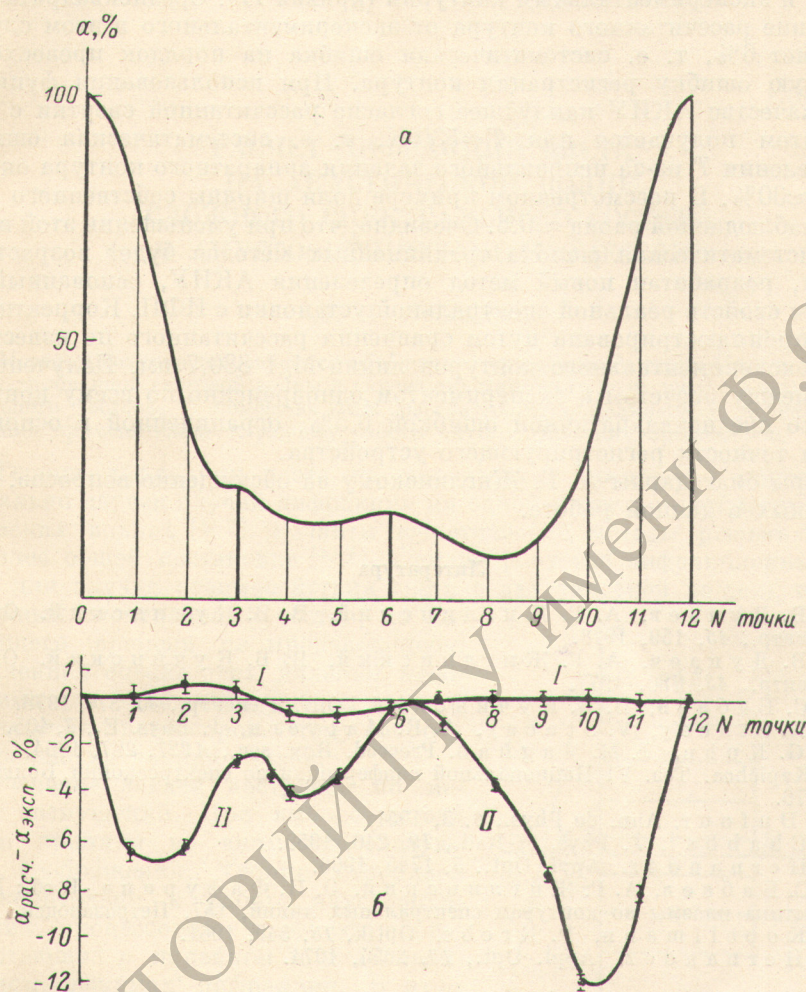


Рис. 3. Результаты сравнения рассчитанной свертки с экспериментальным контуром спектральной линии MgI 880.7 нм.

а — экспериментальная запись распределения яркости в СТС линии MgI 880.7 нм, возбуждаемой в источнике света с полым катодом длиной 40 мм, диаметром 7 мм при силе разрядного тока 50 ма и давлении рабочего газа (неона) 0.5 тор; используется ФЭУ-22, расстояние между фотокатодом которого и выходной диафрагмой установки равно ≈ 10 см; толстые вертикальные штрихи соответствуют положению компонентов изотопов Mg^{24} , Mg^{25} , Mg^{26} ; б — разность ординат рассчитанного контура и экспериментального; I — при расчете свертки в качестве АКIU использован контур, определенный предложенным в работе методом; II — в качестве АКIU взята функция Эри. В обоих случаях при расчете свертки использован доплеровский собственный контур при $T=405$ К.

давался таблицей. В двенадцати независимых равноотстоящих точках были экспериментально измерены и рассчитаны относительные ординаты наблюдаемого контура линии MgI 880.7 нм. Среднеквадратичное отклонение рассчитанной свертки при оптимальной $T=405$ К от экспериментального контура (кривая I на рис. 3, б) составляет 0.5% и практически совпадает с ошибкой фотометрической записи контура, равной 0.4%.

Хорошее согласие расчета и эксперимента во всех точках экспериментальной кривой свидетельствует о правильности определения АКIU.

Проделанная выше процедура одновременно является способом определения T с использованием информации, содержащейся во всех неза-

висимых точках наблюдаемого контура. При таком определении также легко определить наличие или отсутствие систематической ошибки, обусловленной неправильным заданием аппаратного контура. Посмотрим, к каким ошибкам в нашем примере приводит, например, использование функции Эри в качестве АКIU. На рис. 3, б приведена разница между рассчитанной сверткой функции Эри с собственным контуром при $T=405$ К и экспериментальным контуром (кривая II). Среднеквадратичное отклонение рассчитанного контура от экспериментального в этом случае составляет 6%, т. е. систематическая ошибка на порядок превосходит случайную ошибку регистрации контура. При использовании функции Эри в качестве АКIU наилучшее согласие рассчитанной свертки с экспериментом получается при $T=530$ К, т. е. систематическая ошибка в определении T из-за неправильного задания аппаратного контура оказывается $\approx 30\%$. В рассмотренном примере доля ширины собственного контура в наблюдаемой равна ≈ 0.6 . Очевидно, что при уменьшении этой величины систематическая ошибка традиционных методов будет возрастать.

Итак, разработан новый метод определения АКIU, основанный на изучении свойств реальной спектральной установки с ИФП. Корректность метода проиллюстрирована путем сравнения рассчитанного по известной СТС и экспериментального контуров линии MgI 880.7 нм. Получено согласие между расчетом и экспериментом одновременно по всему контуру линии со среднеквадратичной ошибкой 0.5%, ограниченной в основном уровнем точности регистрирующего устройства.

Авторы благодарны А. Г. Жиглинскому за обсуждение вопросов, рассмотренных в данной работе.

Литература

- [1] В. В. Дунаев, А. Г. Жиглинский, В. В. Кучинский. Опт. и спектр., 45, 159, 1978.
- [2] В. В. Дунаев, А. Г. Жиглинский, В. В. Кучинский. Опт. и спектр., 43, 780, 1977.
- [3] В. С. Бабаев, В. В. Кучинский. Опт. и спектр., 45, 374, 1978.
- [4] D. N. Stacey, V. Stacey, A. R. Malvern, J. Phys. E., 7, 405, 1974.
- [5] H. G. Kuhn, J. M. Vaughan. Proceed. Roy. Soc., A227, 297, 1964.
- [6] S. Karichsa. Тез. VI Национальной конференции по спектроскопии, Болгария, 1976.
- [7] Ch. Dufour. Ann. de Phys., 6, 5, 1951.
- [8] R. Chabbal. J. Phys. et Rad., 19, 246, 1958.
- [9] G. Hernandez. Appl. Opt., 5, 1745, 1966.
- [10] В. С. Бабаев, А. Г. Жиглинский, Э. Н. Фафурин. В сб.: Диагностика плазмы по контурам спектральных линий, 157, Петрозаводск, 1977.
- [11] G. Korellmann, P. Krebs. Optik, 18, 349, 1961.
- [12] G. Hernandez. Appl. Opt., 13, 2654, 1974.

Поступило в Редакцию 14 ноября 1977 г.