

Interference Effect of plasma diagnostics
Anishchenko Yu.¹, Nosov K.²
Эффект интерференции в диагностике плазмы
Анищенко Ю. В.¹, Носов К. В.²

¹Анищенко Юлия Викторовна / Anishchenko Yulia – бакалавр техники и технологии, магистрант;

²Носов Константин Валерьевич / Nosov Konstantin – аспирант,
кафедра плазменных энергетических установок,

Московский государственный технический университет имени Н. Э. Баумана, г. Москва

Аннотация: в данной работе выполнено экспериментальное определение пространственной электронной плотности n_e с помощью интерферометрии. Приведено описание метода расчета и стенда для проведения эксперимента.

Abstract: this paper presents the experimental determination of the spatial electron density n_e using interferometry. The description of the method of calculation and the stand for the experiment was shown.

Ключевые слова: интерферометрия, электронная плотность, призма Волластона, диагностика плазмы, интерферометр Номарского.

Keywords: interferometry, electron density, Wollaston prism, plasma diagnostics, Nomarski interferometer.

Интерференционные методы получили широчайшее распространение в области диагностики низкотемпературной плазмы при анализе фазовых неоднородностей [1], а именно при исследовании флуктуаций в плазме. Эффект интерференции волн используется в диагностике плазмы при выявлении изменения ее температуры или плотности.

Рассмотрим интерференцию двух монохроматических волн. Пусть на экран Р падают две монохроматические линейно поляризованные волны E_1 и E_2 , с параллельными векторами поляризации. Это позволяет использовать скалярное приближение. В силу линейности уравнений Максвелла по E для суммарной волны в плоскости Р имеем.

$$E_p(x, y) = E_1(x, y, t) + E_2(x, y, t) \quad (1)$$

Для интенсивности излучения получим

$$I(x, y, t) = I_1 + I_2 + 2(I_1 I_2)^{\frac{1}{2}} \langle \cos(\delta\varphi + t\delta\omega) \rangle + \\ + 2(I_1 I_2)^{\frac{1}{2}} \langle \cos[(\omega_1 + \omega_2)t + \varphi_1 + \varphi_2] \rangle \quad (2)$$

где $\delta\varphi = \varphi_2(x, y) - \varphi_1(x, y)$, а $\langle \ \rangle$ обозначает усреднение по времени.

Последнее слагаемое в результате усреднения по времени обнуляется, и тогда получается:

$$I = I_1 + I_2 + 2(I_1 I_2)^{\frac{1}{2}} \langle \cos(\delta\varphi + t\delta\omega) \rangle \quad (3)$$

Если время интегрирования фотоприемника равно τ , то для косинусоидального множителя в последнем слагаемом получим:

$$\frac{1}{\tau} \int_0^\tau \cos(\delta\varphi + t\delta\omega) dt = \frac{2 \sin\left(\frac{\tau\delta\omega}{2}\right)}{\tau\delta\omega} \cos\left(\delta\varphi - \frac{\tau\delta\omega}{2} + t\delta\omega\right) dt. \quad (4)$$

В результате

$$I = I_1 + I_2 + \frac{2 \sin\left(\frac{\tau\delta\omega}{2}\right)}{\tau\delta\omega} \sqrt{I_1 I_2} \cos\left(\delta\varphi - \frac{\tau\delta\omega}{2} + t\delta\omega\right). \quad (5)$$

Это уравнение является основным соотношением для интерференции двух монохроматических волн. Слагаемое, содержащее косинус разности фаз, называется интерференционным членом.

Эффект интерференции волн используется в диагностике плазмы при выявлении изменения ее температуры или плотности, которые приводят к изменению показателя преломления.

Пусть одна из волн проходит через оптическую неоднородность, имеющую некоторое пространственное распределение показателя преломления

$$n = n_0 + \delta n(x, y, z), \quad (6)$$

где n_0 – показатель преломления невозмущенной области.

В результате для данной волны фаза $\varphi(x, y)$ в плоскости регистрации изменится в зависимости от $\delta n(x, y, z)$ на величину

$$\delta\varphi(x, y) = \frac{2\pi}{\lambda} \int_L \delta n(x, y, z) dz. \quad (7)$$

Интегрирование происходит по пути луча внутри неоднородности. При этом изменение $\delta\varphi$ приведет к сдвигу интерференционной полосы.

Сдвиг полосы в некоторой точке экрана будет определяться формулой

$$\delta m = m - m_0 = \frac{\delta\varphi(x, y)}{2\pi}, \quad (8)$$

где m_0 – порядок интерференционной полосы при отсутствии неоднородностей, а m – порядок полосы в той же точке при ее наличии.

При некоторых видах симметрии неоднородности $n(x, y, z) = n(x, y)$ уравнение преобразуется следующий вид:

$$\delta\varphi(x, y) = 2 \frac{\pi L \delta n(x, y)}{\lambda}. \quad (9)$$

Тогда изменение показателя преломления можно будет найти по формуле

$$\delta n(x, y) = \frac{\lambda \delta m}{L}. \quad (10)$$

На рисунке 1 показана схема измерения.

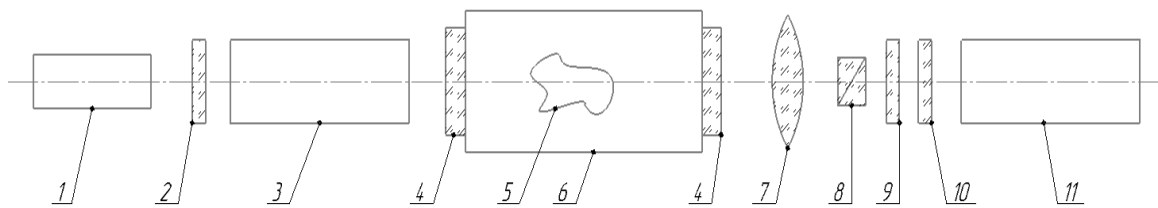


Рис. 1. Схема измерения, 1 – лазер; 2 – линейный поляризатор; 3 – телескоп; 4 – оптическое окно; 5 – оптическая неоднородность; 6 – вакуумная камера; 7 – собирающая линза; 8 – призма Воллостона; 9 – поляризационный фильтр; 10 – светофильтр; ПЗС - камера с ЭОП

Лазерный луч проходит через линейный поляризатор 2, затем попадает в телескоп 3, после чего его диаметр расширяется до нескольких сантиметров. После пучок попадает в вакуумный объем, содержащий исследуемую оптическую неоднородность 5, через оптическое окно 4. Испытав преломление в плазме, пучок попадает на фокусирующую линзу 7, которая уменьшает диаметр пучка. В призме Воллостона происходит деление пучка на опорный и интерферирующий. Лучи проходят через поляризационный фильтр 9. Светофильтр 10 необходим для регулировки интенсивности излучения (яркости картинка). На поверхность ПЗС-приемника проецируется интерференционная картина, которая визуализируется с помощью машинной обработки.

Поляризационная призма Воллостона состоит из двух клиньев (кристаллический кварц или исландский шпат), соединённых с помощью оптического контакта или склейки и имеющих направления оптических осей перпендикулярные друг другу. Два выходящих луча имеют ортогональную поляризацию и расходятся почти симметрично относительно падающего на угол, зависящий от длины волны и отношения длины к апертуре.

На рисунке 2 изображен интерферометр Номарского.

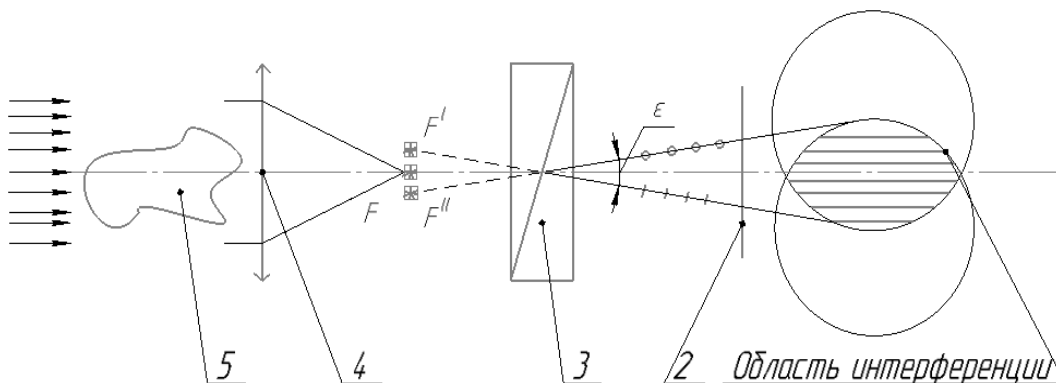


Рис. 2. Интерферометр Номарского

Так как плазменное образование состоит из частиц разного рода, а в частности, ионов и электронов, то формула (9) [8] примет следующий вид:

$$\delta\varphi(x, y) = -4,49 * 10^{-14} 2\pi\lambda \int_L n_e(x, y, z) dz + \frac{4\pi^2}{\lambda} \sum c_i \quad (10)$$

Изменение показателя преломления обусловлено вкладом не только электронов, но также атомов и ионов различных кратностей. В условиях данного эксперимента можно допустить, что вклад электронов является преобладающим.

По формуле (11) [8] можно оценить распределение плотности электронов в электродном промежутке

$$n_e = \frac{8\pi^2 c^2 \varepsilon_0 m_e n_0}{\lambda^2 e^2} \delta n \quad (11)$$

где n_e – концентрация электронов; c – скорость света; ε_0 – электрическая постоянная; m_e – масса электрона; n_0 – показатель преломления буферного газа (для вакуума $n_0 = 1$); λ – длина волны зондирующего излучения; e – заряд электрона; δn – изменение показателя преломления. Все величины выражены в размерности СИ.

На рисунке 3 изображен снимок с интерференционной картины.

В центре изображения между катодом и анодом видны возмущенные интерференционные линии. Расстояние между катодом и анодом составляло 4 мм, а давление 1000 Па.

На рисунке 4 отмечены номера интерференционных линий. Треугольниками отмечены те точки пространства, для которых производился расчёт электронной плотности.

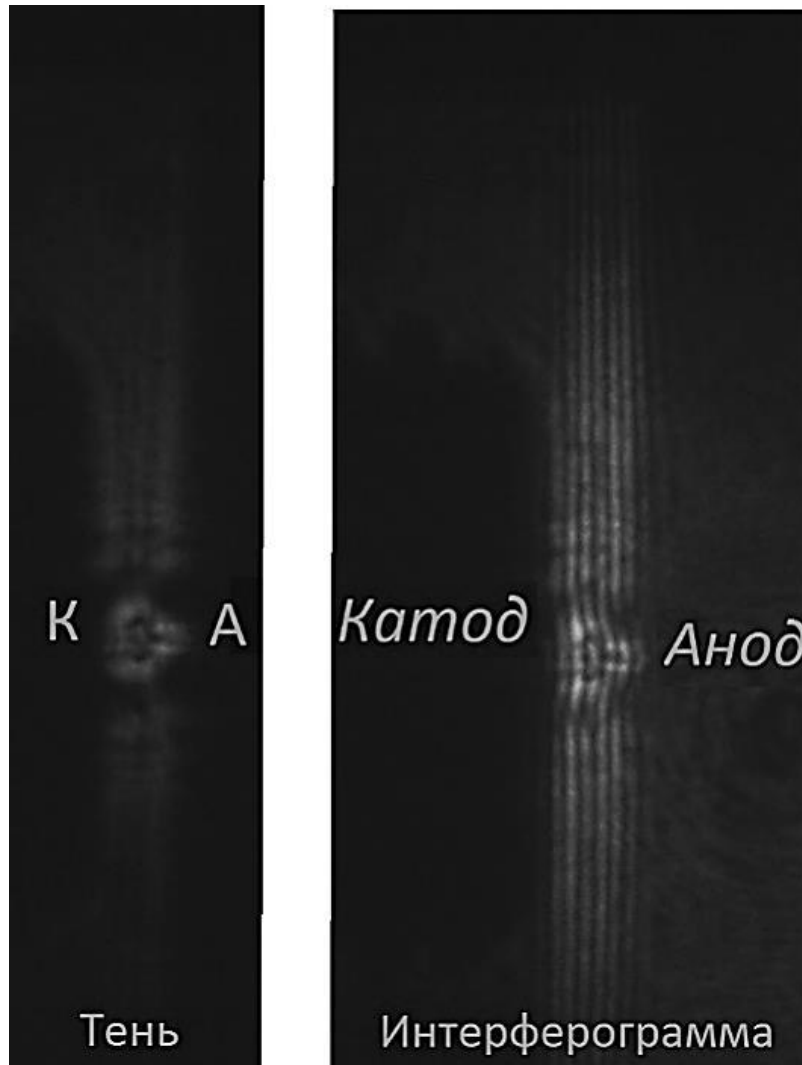


Рис. 3. Интерференционная картина

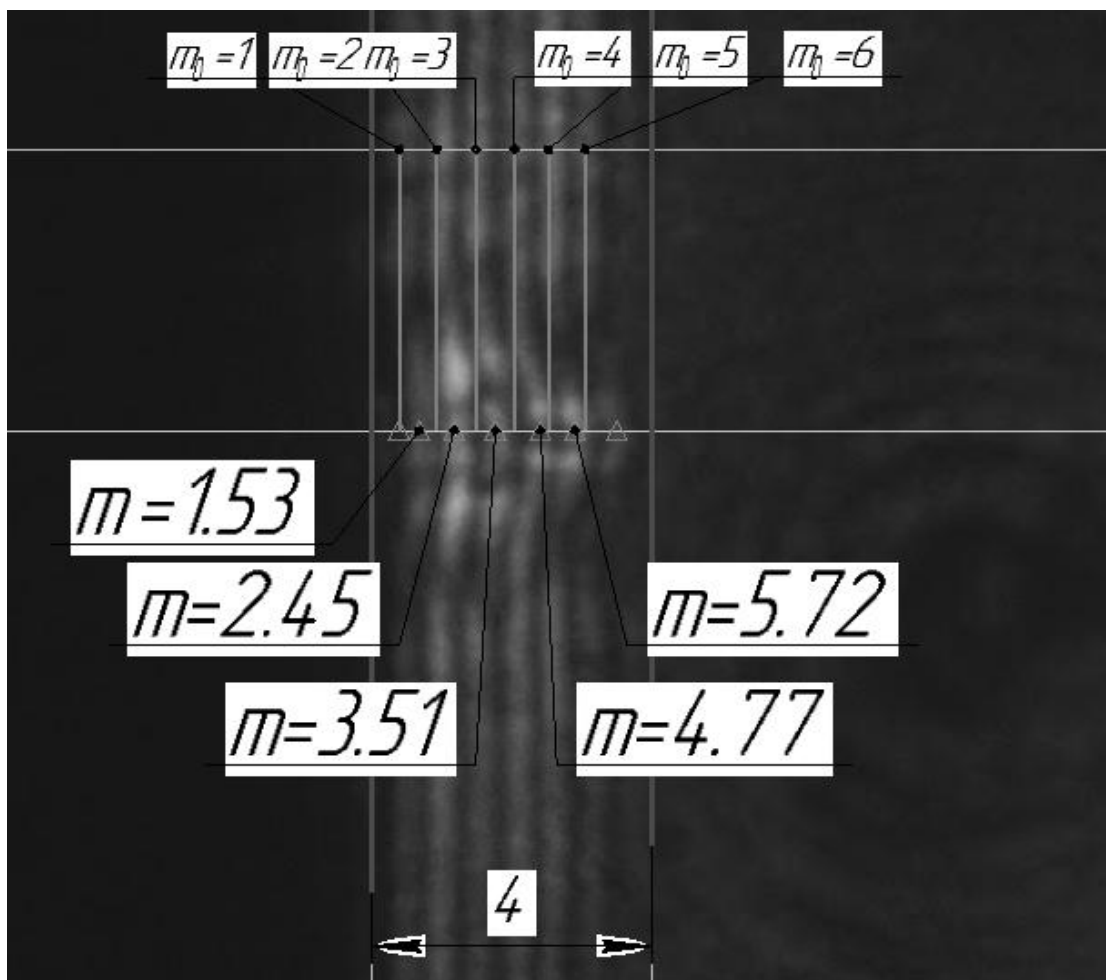


Рис. 4. Распределение интерференционных линий

На рисунке 5 изображен график пространственного распределения электронной концентрации. График был построен в математическом программном пакете MathCADPrime.

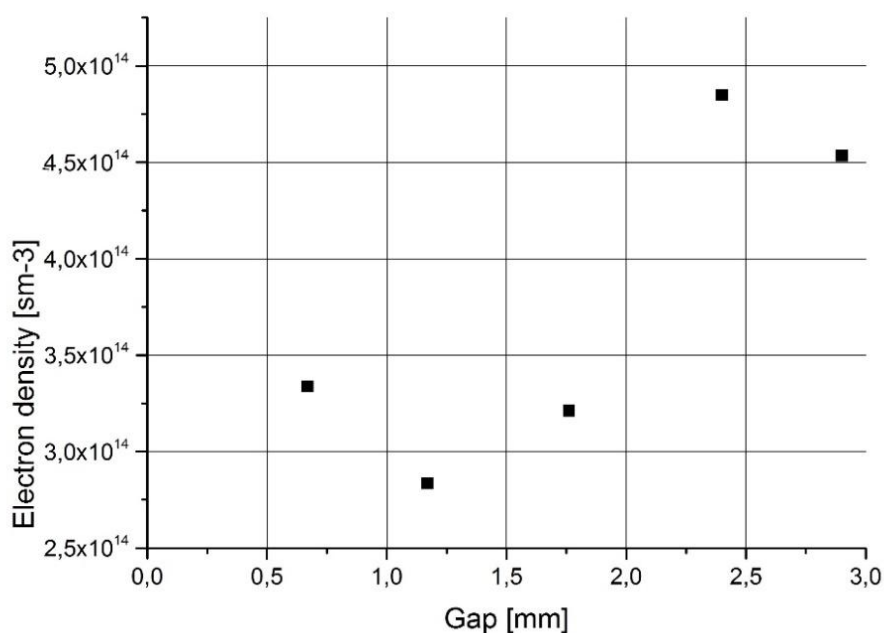


Рис. 5. Пространственное распределение электронной плотности

Заключение

В данной работе показан наглядный пример применения интерферометрических методов для диагностики плазмы. Выявлена прямая зависимость электронной плотности от коэффициента преломления плазмы. Опыт показал, что плотность электронов практически не изменяется по всей длине зазора, т.е. не зависит от величины промежутка. Экспериментальные значения электронной плотности могут служить справочным материалом для разработчиков и исследователей.

Литература

1. Кузнецов А. П. Лазерная интерферометрия в диагностике плазмы: дис. ... д-р. физ.-мат. наук: 01.04.08. М., 2012.
2. George S., Koay C., Takenoshita K., Bernath R. EUV spectroscopy of mass-limited Sn-doped laser microplasmas // Proc. SPIE, 2005. V. 5751. P. 779-788.
3. Корышев О. В., Ноготков Д. О., Протасов Ю. Ю., Телех В. Д. Термодинамические, оптические и транспортные свойства рабочих веществ плазменных и фотонных энергетических установок. Т. 1 / Под ред. Ю. С. Протасова. М.: Изд. МГТУ им. Н. Э. Баумана, 1999. 640 с.
4. Протасов Ю. Ю., Телех В. Д. Термодинамические, оптические и транспортные свойства рабочих веществ плазменных и фотонных энергетических установок. Т. II / Под ред. Ю. С. Протасова. М.: Изд. МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2000. 712 с.
5. Протасов Ю. С., Телех В. Д. Термодинамические, оптические и транспортные свойства рабочих веществ плазменных и фотонных энергетических установок. Т. III / Под ред. Ю. С. Протасова. М.: Изд. МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2002. 438 с.
6. Оптические свойства излучающих газоплазменных потоков сложного химического состава / Ю. С. Протасов, Ю. Ю. Протасов, В. Д. Телех // в кн. Энциклопедия низкотемпературной плазмы. Том IX-4. Плазменная аэродинамика / Под ред. В. М. Битюрина, В. Е. Фортова. М.: Янус-К, 2014. С. 452-508.
7. Campos D., Harilal S. S., Hassanein A. Laser wavelength effects on ionic and atomic emission from tin plasmas // Proc. SPIE, 2005. V. 6020. P. 704-710.
8. Локтионов Е. Ю., Протасов Ю. Ю., Телех В. Д., Хазиев Р. Р. Комплексная обработка интерферограмм светозэрозийных газоплазменных потоков в вакууме // Приборы и техника эксперимента, 2013. № 1. С. 53-62.
9. Ситников Д. С., Комаров П. С., Овчинников А. В., Ашитков С. И. Фемтосекундная фурье-интерферометрия неидеальной плазмы // Журнал технической физики, 2009. № 4.

10. Определение температуры электронного газа в ртутной плазме оптическим методом // Автоматизированный лабораторный практикум с удаленным доступом. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://lud.bmstu.ru/indus/demo/scripts/html/perf/porad.htm/> (дата обращения: 27.04.2016).
11. *Koshelev K. N., Krivitsun G. N., Gayasov P. S.* Experimental study of laser produced gadolinium plasma emitting at 6.7 nm: International workshop on EUV, 2012. October 13-15. Vol. 107 (45). Pp. 16028–16033. doi:10.1073/pnas.0903864106.