

5/1 760 1466

ОРДЕНА ЛЕНИНА АКАДЕМИЯ НАУК УССР
ОРДЕНА ЛЕНИНА ФИЗИКО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ

ХФТИ 75-2

В.Л.БЕРЕЖНЫЙ, В.И.КОНОНЕНКО

СУБМИЛЛИМЕТРОВЫЕ ИНТЕРФЕРОМЕТРЫ ДЛЯ
ДИАГНОСТИКИ ПЛАЗМЫ

Харьков 1975

ОРДЕНА ЛЕНИНА АКАДЕМИЯ НАУК УССР
ОРДЕНА ЛЕНИНА ФИЗИКО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ

ХФТИ 75-2

В.Л.БЕРЕЖНЫЙ, В.И.КОНОНЕНКО

СУБМИЛЛИМЕТРОВЫЕ ИНТЕРФЕРОМЕТРЫ ДЛЯ
ДИАГНОСТИКИ ПЛАЗМЫ

Харьков 1975

Для измерения концентрации электронов в плазменных установках в интервале $10^{13} - 10^{16} \text{ см}^{-3}$ созданы интерферометры по схеме Маха-Рожественского, Майкельсона и трехзеркального с источником излучения - субмиллиметровым *НСЛ* лазером ($\lambda = 337 \text{ мкм}$). Приведены результаты исследования работы интерферометров в лабораторных условиях при измерении плотности плазмы безэлектродного индукционного разряда. Показано, что для полного перекрытия диапазона измеряемых плотностей $10^{13} - 10^{16} \text{ см}^{-3}$ необходимо, чтобы температура электронов плазмы с плотностью, большей чем 10^{15} см^{-3} , была выше 10 эВ. Данные интерферометры, кроме измерения плотности, могут быть использованы для определения частоты соударений и температуры электронов в интервале 0,1 - 10 эВ. Проведена сравнительная оценка быстродействия трехзеркального интерферометра.

Для решения ряда научно-технических задач в исследованиях по термоядерному синтезу необходимы методы бесконтактного определения плотности электронов в плазменных установках в интервале $10^{13} - 10^{16} \text{ см}^{-3}$.

СВЧ-методы, получившие широкое применение для измерения плотности плазмы, здесь ограничиваются высокой плотностью. Применение методов оптической интерферометрии в видимой области спектра затруднительно из-за малой их чувствительности. Более перспективными методами измерения плотности в данной области могут быть интерферометрические методы, использующие в качестве источников электромагнитного излучения субмиллиметровые лазеры. Такие интерферометры менее чувствительны к вибрациям, чем оптические, и обладают лучшим пространственным разрешением по сравнению с микроволновыми. Целью настоящей работы являлось создание интерферометров по типу оптических Маха-Рожественского, Майкельсона и трехзеркального - с источником электромагнитного излучения - субмиллиметровым HCN лазером ($\lambda = 337 \text{ мкм}$) для определения основных параметров лабораторной плазмы.

I. Исходные данные для решения ряда практических задач по определению параметров плазмы можно получить из анализа распространения электромагнитных волн в плазме [1].

Наиболее просто определение концентрации электронов и их температуры может быть выполнено с помощью плоских электромагнитных волн при такой их ориентации распространения в плазме, чтобы выполнялись условия $\vec{k} \perp \vec{H}$ и $\vec{E} \parallel \vec{H}$, где \vec{k} - волновой вектор, \vec{E} - вектор напряженности электричес-

кого поля волны и \vec{H} - вектор напряженности магнитного поля в плазме (поперечное распространение электромагнитной волны относительно направления магнитного поля). При этом, если концентрация электронов в плазме меньше критической для данной электромагнитной волны и эффективная частота соударений значительно меньше круговой частоты волны, фазовая постоянная β и постоянная затухания α для плоской электромагнитной волны будут определяться следующим соотношением:

$$\beta = \frac{\omega}{c} \left(1 - \frac{N_e}{N_{кр}}\right)^{1/2}, \quad (1)$$

$$\alpha = \frac{1}{2c} \nu \frac{N_e}{N_{кр}} \left(1 - \frac{N_e}{N_{кр}}\right)^{-1/2}, \quad (2)$$

а показатель преломления плазмы, как

$$n = \left(1 - \frac{N_e}{N_{кр}}\right)^{1/2}. \quad (3)$$

Здесь c - скорость света; ω - круговая частота волны; N_e - концентрация электронов в плазме; $N_{кр}$ - критическая концентрация электронов, $\nu = \frac{2,6 \cdot N_e \ell_n \Lambda}{T_e^{3/2}}$ - электронно-ионная частота соударений; $\ell_n \Lambda$ - кулоновский логарифм и T_e - температура электронов.

При распространении электромагнитной волны через плазму происходит изменение фазы волны относительно фазы волны, распространяющейся в свободном пространстве, на величину

$$\Delta \varphi = \frac{2\pi}{\lambda} L \left(1 - \sqrt{1 - \frac{N_e}{N_{кр}}}\right), \quad (4)$$

определяемую разностью показателей преломления свободного пространства и плазмы, и размером плазмы по направлению распространения - L . Когда показатель преломления плазмы является функцией координаты по направлению распространения волны (неоднородная плазма), затухание волны и относительный фазовый сдвиг будут определяться интегральными значениями

$$x = \ell_n \frac{E}{E_0} = - \int_0^L \alpha dz = - \frac{1}{2c} \int_0^L \frac{N_e(z) \nu(z)}{N_{кр} \sqrt{1 - \frac{N_e(z)}{N_{кр}}}} dz, \quad (5)$$

$$\Delta\varphi = \frac{2\pi}{\lambda} \int_0^L \left[1 - \sqrt{1 - \frac{N_e(z)}{N_{кр}}} \right] dz. \quad (6)$$

Если теперь электромагнитная волна будет распространяться вдоль направления магнитного поля в плазме, то на выходе из плазмы плоскость поляризации электрического вектора волны окажется повернутой на угол

$$\Theta = 1,5 \cdot 10^{-15} \lambda^2 \int_0^L H_0 N_e dz \quad (\text{град}), \quad (7)$$

где H_0 - напряженность магнитного поля в эрстедах; λ - длина волны в сантиметрах; N_e - плотность плазмы в см^{-3} ; L - размер плазмы вдоль направления магнитного поля в сантиметрах.

Таким образом, измеряя фазовый сдвиг волны, затухание при прохождении через плазму, можно определить основные параметры плазмы: плотность N_e , частоту соударений ν и температуру электронов T_e . При распространении волны вдоль магнитного поля плазмы по углу поворота плоскости поляризации вектора электрического поля волны можно определить напряженность магнитного поля в плазме.

II. В качестве источника электромагнитных колебаний для интерферометров нами применялся изготовленный в ХГУ субмиллиметровый лазер непрерывного действия [2]. Основанием лазера служит труба из огнеупорного стекла. Внутри этой трубы помещена цилиндрическая разрядная камера из кварцевого стекла ($d = 50$ мм), охлаждаемая проточной водой. Резонатор лазера длиной 2500 мм образован двумя медными сферическими зеркалами с радиусом кривизны 5000 мм. Вывод излучения из резонатора осуществляется через отверстия связи в сферических зеркалах ($d = 6$ мм) и торцевые окна лазера, уплотненные на вакуум лавсановой пленкой толщиной 20 мкм. Лазер работал на смеси метан-воздух, длина волны излучения 337 мкм, расходимость пучка излучения $1,5^\circ$, стабильность частоты 10^{-8} , мощность излучения в непрерывном режиме около 30 мВт. Питание лазера

осуществлялось от источника постоянного напряжения 5 кВ при токе 0,5 А. Излучение лазера детектировалось приемником, работающим на базе точечного контакта металл - Zn Se при температуре $T = 300^\circ\text{K}$ (инерционность $\tau < 10^{-11}$ с [3]).

III. Используя вышеописанный субмиллиметровый лазер, мы создали интерферометры по типу Маха-Рождественского, Майкельсона, трехзеркального. Исследована их работа на лабораторной плазменной установке. Применение того или иного типа интерферометра для измерений в основном будет определяться конструкцией плазменной установки и наличием места для размещения схемы интерферометра и субмиллиметрового лазера с блоком питания и системой откачки.

На рис. 1, а приведена схема интерферометра Маха-Рождественского. Субмиллиметровый лазер I в схеме является источником электромагнитного излучения. Резонатор лазера образован зеркалами 2 и 3. Пучок излучения из резонатора лазера через отверстие связи зеркала 3 поступает на делитель мощности 4, который представляет собой полупрозрачное зеркало размером $80 \times 80 \text{ мм}^2$ из лавсановой пленки толщиной 20 мкм. При этом примерно 80 % мощности пучка направляется в измерительное плечо интерферометра, ограничиваемое зеркалами 4, 5, 6 и 7 (исследуемая среда может быть размещена между зеркалами 4 - 5, 5 - 6, либо 6 - 7). В опорное плечо интерферометра, заключенное между зеркалами 4 - 7, поступает 20 % мощности пучка излучения. Зеркала интерферометра 5 и 6 плоские с алюминиевым покрытием, зеркало 7 - полупрозрачное из лавсановой пленки. Пучки излучения из опорного и измерительного плеч после зеркала 7 поступают на приемник 8. Сигнал с приемника через усилитель 9 подавался для регистрации на осциллограф 10. Примерные геометрические размеры интерферометра указаны на рисунке. Выравнивание амплитуд сигналов опорного и измерительного плеч, а также настройка интерферометра по фазе сигналов осуществлялась компенсационными пластинками из фторопласта - IV, помещаемыми в опорное плечо интерферометра.

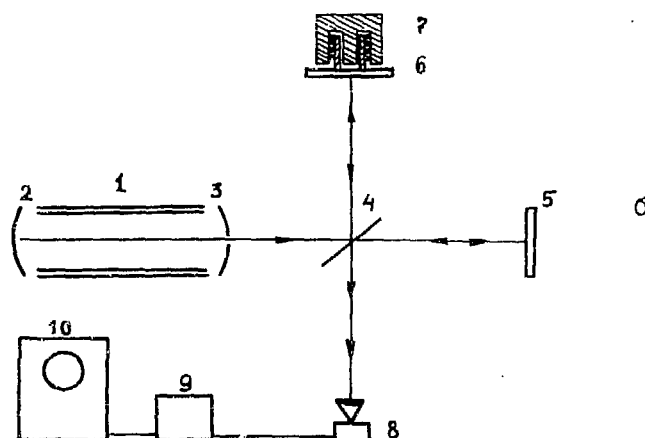
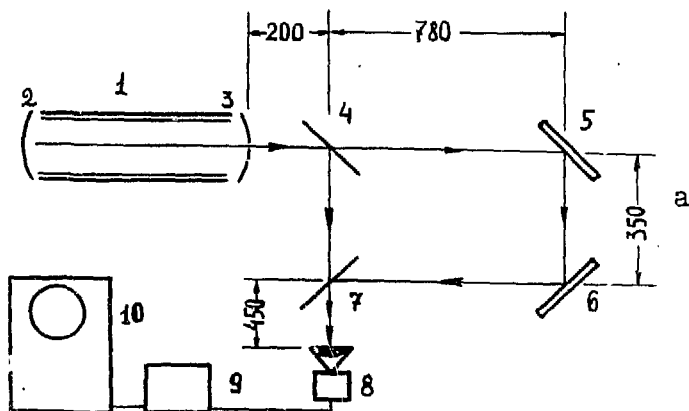


Рис. 1. Схема интерферометра Маха-Рождественского - а:
 1 - субмиллиметровый лазер; 2, 3 - сферические зеркала резонатора лазера; 4, 7 - полупрозрачные плоские зеркала; 5, 6 - плоские зеркала с алюминиевым покрытием; 8 - приемник излучения; 9 - усилитель; 10 - осциллограф;

Схема интерферометра Майкельсона - б:
 1 - субмиллиметровый лазер; 2, 3 - зеркала резонатора лазера; 4 - полупрозрачное зеркало; 5, 6 - плоские зеркала с алюминиевым покрытием; 7 - электродинамическая система для перемещения зеркала 6; 8 - приемник излучения; 9 - усилитель; 10 - осциллограф

Схема интерферометра типа Майкельсона показана на рис. 1, б. В этой схеме интерферометра измерительное плечо образовано полупрозрачным зеркалом 4 и плоским зеркалом 6, а опорное плечо тем же полупрозрачным зеркалом 4 и зеркалом 5. Часть пучка излучения лазера I после отражения от полупрозрачного зеркала 4 поступает в измерительное плечо, оставшаяся часть пучка через полупрозрачное зеркало 4 поступает в опорное плечо. В измерительном плече пучок, отразившись от зеркала 6 (в этой схеме пучок излучения дважды проходит через исследуемую среду), через полупрозрачное зеркало 4 попадает на приемник излучения 8. На приемник излучения также попадает пучок из опорного плеча после отражения от зеркала 5 и полупрозрачного зеркала 4. Сигнал с приемника через усилитель 9 подавался на осциллограф 10 для регистрации. Для настройки и калибровки схемы интерферометра зеркало 6 укреплялось на электродинамической системе 7, позволявшей перемещать зеркало параллельно самому себе и изменять длину измерительного плеча на величину, равную нескольким длинам волн.

На рисунках 2, а и б показаны две схемы более простых трехзеркальных интерферометров, отличающихся только способом вывода пучка излучения из интерферометра на приемник излучения. Если в интерферометрах Маха-Рожественского и Майкельсона субмиллиметровый лазер использовался только как источник электромагнитного излучения, то в данных схемах резонатор самого лазера, образованный зеркалами 2 и 3, является составной частью интерферометра. Внешние плоские сплошные зеркала 4 (рис. 2, а) и 5 (рис. 2, б), укрепленные на электродинамических системах, вместе с зеркалом 3 резонатора лазера составляют внешний (измерительный) резонатор интерферометра, сильно связанный с резонатором лазера. В схеме интерферометра рис. 2, а вывод пучка излучения на приемник 6 осуществляется через отверстие зеркала 2 резонатора лазера, в схеме рис. 2, б - при помощи полупрозрачного зеркала 4, установленного во внешнем резонаторе.

В интерферометрах Маха-Рожественского и Майкельсона интерферируют пучки, поступающие на приемники из опорного и

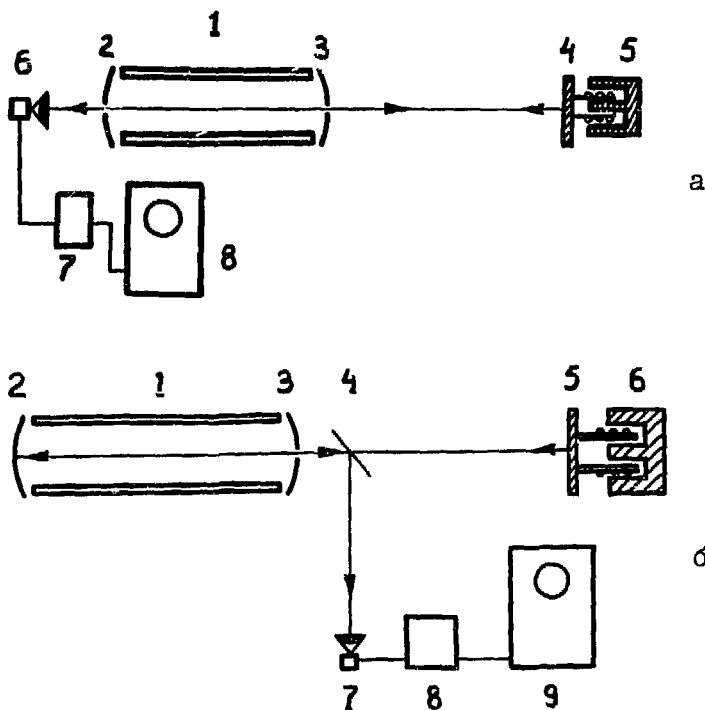


Рис. 2. Схемы трехзеркальных интерферометров:
 а). 1 - лазер; 2, 3 - зеркала резонатора лазера; 4 - внешнее плоское зеркало с алюминиевым покрытием; 5 - электродинамическая система; 6 - приемник излучения; 7 - усилитель; 8 - осциллограф; б). 1, 2, 3 - лазер и зеркала резонатора; 4 - полупрозрачное плоское зеркало; 5 - внешнее плоское зеркало; 6 - электродинамическая система; 7 - приемник; 8 - усилитель; 9 - осциллограф

измерительного плеча, в результате изменения оптической длины измерительного плеча (при изменении показателя преломления исследуемой среды). В случае трехзеркального интерферометра изменение оптической длины внешнего резонатора приводит к изменению мощности излучения лазера. При этом приемник отсчитывает

разность хода в виде модуляционных циклов, каждый из которых будет эквивалентен изменению оптической длины измерительного резонатора на величину, равную $\lambda/2$ [4].

Все узлы интерферометров были смонтированы на жесткокрепленных массивных оптических скамьях вместе с субмиллиметровым лазером. Юстировка зеркал в схеме интерферометров и лазера осуществлялась при помощи квантового генератора ДГ-55.

В случае однородной плотности плазмы и монотонного ее изменения во времени одна интерференционная полоса (изменение фазы на 2π) для интерферометра Маха-Рождественского, согласно выражению (4), соответствует $N_e L = 6,62 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-2}$, для интерферометров Майкельсона и трехзеркального (изменение фазы на π) $N_e L = 3,31 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-2}$. Верхний предел плотности плазмы, который может быть определен с помощью данных интерферометров, ограничен отсечкой электромагнитной волны при $N_{кр} = 9,75 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3}$. Измеряемый нижний предел плотности определяется в основном линейными размерами плазмы вдоль распространения пучка излучения. Так, например, при линейном размере плазмы, равном 10 см, и уверенном отсчете 1/4 интерференционной полосы, нижний предел плотности для интерферометра Маха-Рождественского будет $N_e = 1,65 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-3}$, для интерферометров Майкельсона и трехзеркального $N_e = 8,2 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-3}$. Диапазон измеряемых концентраций в область низких значений может быть расширен; наиболее просто эта задача решается для трехзеркального интерферометра. Существуют два способа достижения этой цели. Первый способ заключается в увеличении числа двойных проходов пучка через плазму в измерительном резонаторе [5]. Однако при этом ухудшается пространственное разрешение, а при большом числе двойных проходов - и временное. Второй способ повышения чувствительности - это измерение малых фазовых сдвигов при помощи абсолютной калибровки. В этом случае внешнее зеркало резонатора устанавливается в точке, вблизи которой, при небольших перемещениях зеркала, интенсивность излучения лазера меняется линейно. Периодические малые колебания зеркала приведут соответственно к модуляции интен-

сивности лазера. Определяя величину смещения зеркала и сравнивая амплитуды модуляции излучения лазера при перемещении зеркала и при изменении плотности плазмы, можно обеспечить более высокую точность отсчета фазового сдвига [6]. Эта точность будет ограничена только естественными флуктуациями интенсивности излучения лазера, шумами регистрирующей аппаратуры и вибрационными шумами интерферометра. Для определения возможного минимального отсчета сдвига фазы в условиях нашей работы были проведены исследования амплитудных и частотных флуктуаций выходного сигнала интерферометра (с приемника-усилителя). При помощи спектрального анализатора СКЧ-3 были обнаружены флуктуации выходного сигнала в диапазоне 20-2000 Гц. Распределение амплитуды флуктуаций сигнала по частотам в указанном диапазоне зависело от соотношения газов в рабочей смеси и тока разряда лазера. При оптимальных условиях генерации лазера максимальная амплитуда флуктуаций сигнала соответствовала частотам 100-200 Гц и составляла 5 % от уровня выходного сигнала, в остальной части диапазона амплитуда флуктуаций была ниже в 4-5 раз. Относительно вибрационных шумов интерферометра в условиях нашей работы необходимо отметить следующее. Если схемы интерферометров работали на длине волны 10,6 мкм, амплитуда вибрационных шумов достигала 60 - 70 % от уровня выходного сигнала, если же интерферометры работали на длине волны 337 мкм, то вибрационные шумы практически отсутствовали (при максимальном усилении). Анализ интерферограмм, полученных при калибровке трехзеркального интерферометра, показал, что минимальный фазовый сдвиг, который может быть зарегистрирован, соответствует отклонению луча осциллографа на его удвоенную толщину и составляет величину $2\lambda/36$. Таким образом, минимальная величина $N_e L$, регистрируемая системой, будет равна $1,8 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-2}$.

IV. Работа интерферометров в лабораторных условиях была исследована при измерении плотности плазмы индукционного разряда [7]. Для улучшения пространственного разрешения пучок излучения лазера вводился по диаметру разрядной камеры через собирающие линзы из фторопласта - IV, установленные в диамет-

тических окнах. Истировка линз осуществлялась истировочными устройствами диагностических окон.

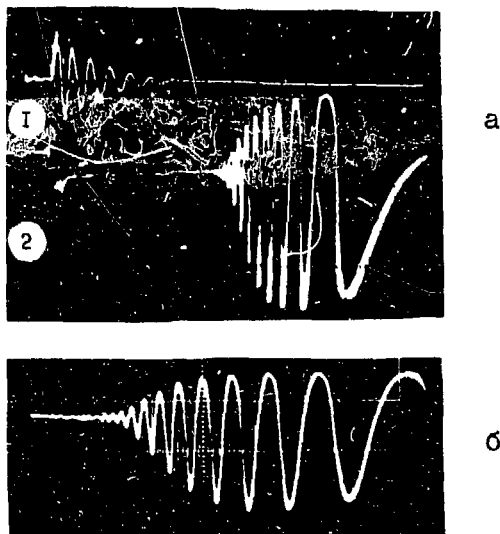


Рис. 3. Осциллограммы сигнала разрядного тока (1) и интерференционного сигнала (2) (20 мкс/дел) - а; Осциллограмма части интерференционной картины при более короткой развертке осциллографа (10 мкс/дел) - б

Для иллюстрации работы трехзеркального интерферометра на рис. 3, а показаны осциллограммы сигналов разрядного тока (1) и интерференции (2), вызванной изменением плотности плазмы в разряде при начальном давлении $p = 4 \cdot 10^{-2}$ мм рт.ст. и зарядном напряжении 15 кВ. Часть интерферограммы при более короткой развертке осциллографа представлена на рис. 3, б. Здесь необходимо отметить следующие особенности данной интерферограммы: отсутствие интерференции на активной стадии разряда и сильное уменьшение амплитуды модуляционных циклов на стадии распада плазмы. Характерно, что при изменении начального давления разряда либо зарядного напряжения интерференционная картина, соответствующая распаду плазмы, практически не изменилась, имело

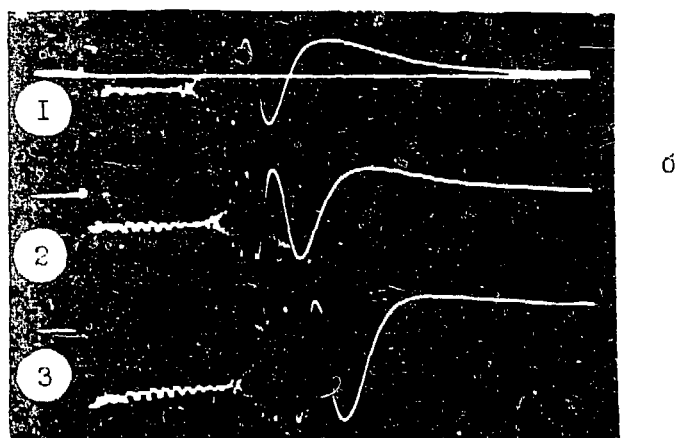
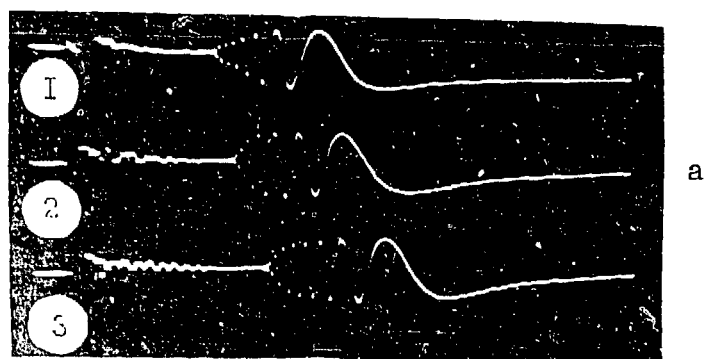


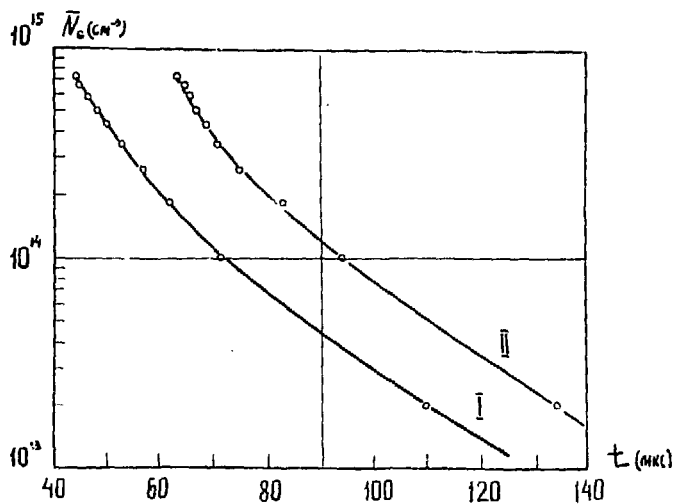
Рис. 4. Осциллограммы сигналов с трехзеркального интерферометра (а) и с интерферометра Маха-Рождественского (б): 1 - зарядное напряжение $U_3 = 5$ кВ; 2 - $U_3 = 10$ кВ; 3 - $U_3 = 15$ кВ; начальное давление водорода $p = 4 \cdot 10^{-2}$ мм рт.ст.; длительность развертки 230 мкс

место только смещение ее во времени относительно начала разряда (рис. 4, а). Общий вид интерференционной картины (рис. 3, 4) сходный с интерферограммами СВЧ-интерферометров при отсечке сигнала. Однако, если бы существовала отсечка сигнала в данном случае, трехзеркальный интерферометр все равно давал бы моду-

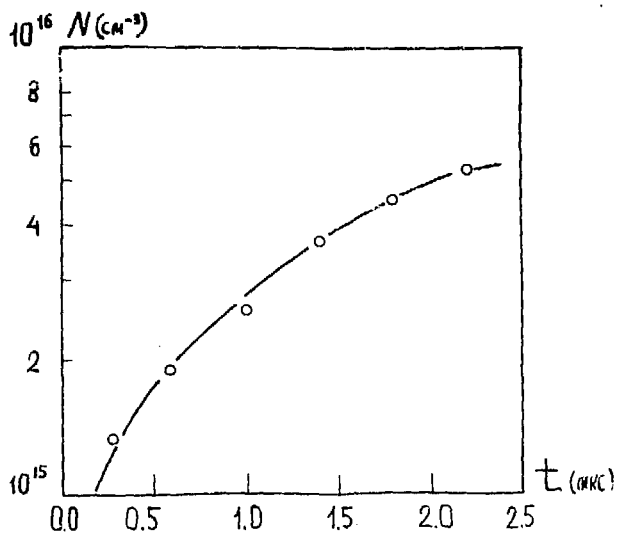
ляционные циклы сигнала. течение времени непрохождения сигнала в результате макроскопического движения отражающих областей плазмы. Можно было предположить, что подобный вид интерференционных картин обусловлен либо неудовлетворительным быстродействием схемы трехзеркального интерферометра, либо недостаточной полосой пропускания предварительного усилителя. Однако, подобные осциллограммы интерференционной картины были получены и с помощью более быстродействующих интерферометров типа Майкельсона и Маха-Рождественского (рис. 4, б), в которых резонатор лазера был исключен из схемы, и лазер использовался только как источник излучения. Что касается предварительного усилителя, то его полоса пропускания $\Delta f = 3$ МГц была достаточной для регистрации интерференционной картины с частотой изменения модуляционных циклов более высокой, чем та, которая была зарегистрирована (500-900 кГц).

Полученные из интерферограмм зависимости изменения плотности во времени для двух значений зарядного напряжения при начальном давлении $p = 4 \cdot 10^{-2}$ мм рт.ст. показаны на рис. 5, а. Согласно этим данным, максимальная средняя плотность определяется величиной $7,3 \cdot 10^{14}$ см⁻³, минимальная (при отсчете $\frac{1}{4}$ интерференционной полосы) - величиной $1 \cdot 10^{13}$ см⁻³. Определенные значения нижнего предела средней плотности хорошо согласуются с данными микроволновых измерений на длине волны 8,2 мм.

Учитывая зависимость плотности N_e от электронной температуры T_e для различных длин поглощения (рис. 6), вычисленную по формулам (2) и $\nu = \frac{2,6 N_e \cdot \epsilon n \lambda}{T_e^{5/2}}$, где $\epsilon n \lambda = 23,1 - \frac{1}{2} \ln N_e + \frac{3}{4} \ln T_e$, а также определенную из интерферограмм максимальную среднюю плотность, можно прийти к выводу о том, что сильное ослабление субмиллиметрового излучения, приводящее к исчезновению интерференции, в основном обусловлено поглощением. Что касается ослабления субмиллиметрового излучения на активной стадии разряда, где существуют значительные азимутальные токи, приводящие к макроскопическим радиальным возмущениям плотности плазмы, то здесь, кроме потерь излучения за счет поглощения, могут быть существенные потери излучения на рефракцию и рассеяние на турбулентных пульсациях плотности плазмы.



a



b

Рис. 5. Изменение средней плотности плазмы во времени - а: I - зарядное напряжение $U_3 = 5$ кВ; II - $U_3 = 15$ кВ; начальное давление водорода $p = 4 \cdot 10^{-2}$ мм рт.ст.; поперечный размер плазмы $L = 8$ см. Изменение средней плотности плазмы во времени во втором полупериоде магнитного поля - б: $U_3 = 15$ кВ; начальное давление $p = 4 \cdot 10^{-2}$ мм рт.ст.

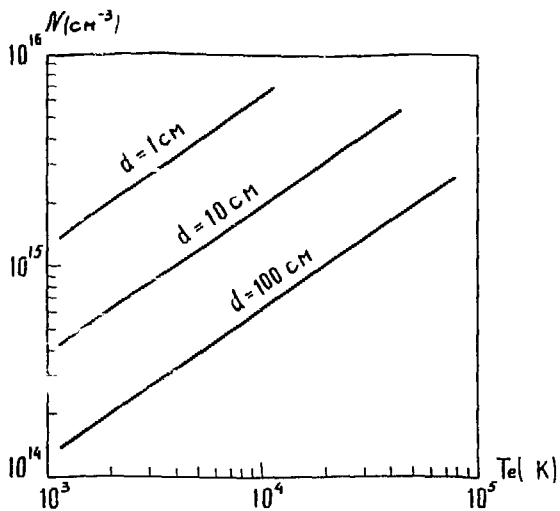


Рис. 6. Зависимость плотности плазмы от температуры электронов для различных длин поглощения -

$$d = \frac{1}{\alpha} = \frac{2c}{\nu} \cdot \frac{N_{кр}}{N_e} \left(1 - \frac{N_e}{N_{кр}} \right)^{1/2}$$

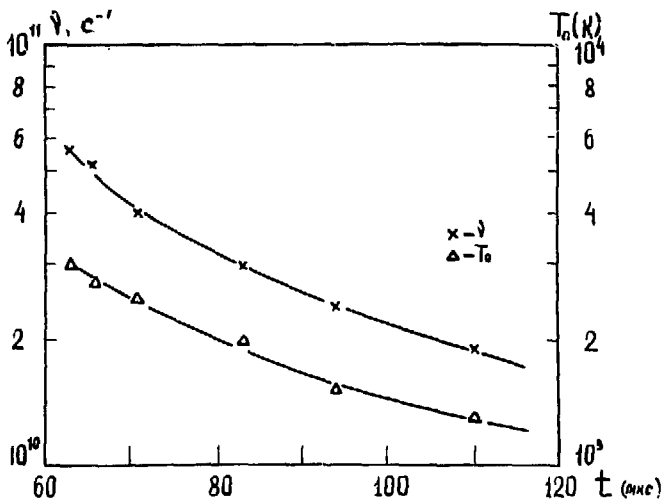


Рис. 7. Изменение частоты соударений и температуры электронов во времени. Начальное давление водорода $p = 4 \cdot 10^{-2}$ мм рт.ст.; $U_3 = 15$ кВ

Считая характеристику детектора излучения близкой к квадратичной, по затуханию интерференционных полос были определены частота соударений ν и в предположении кулоновских столкновений температура электронов плазмы T_e . Результаты анализа приведены на рис. 7. Согласно этим данным, T_e распадающейся плазмы $C, I5 - 0,3$ эВ.

Плотность плазмы на активной стадии разряда была определена этими же интерферометрами при работе лазера на длине волны $10,6$ мкм. Характер изменения плотности во втором полупериоде магнитного поля и ее значение приведены на рис. 5, 6.

Исследования работы интерферометров на плазменной установке позволили также сделать сравнительную оценку быстродействия трехзеркального интерферометра. Быстродействие интерферометров, измеряемое скоростью изменения фазового сдвига, для схем Маха-Рождественского и Майкельсона достаточно высоко и определяется только полосой пропускания регистрирующей системы. В случае трехзеркального интерферометра, где существует сильная связь между резонатором лазера и измерительным резонатором, быстродействие схемы ограничивается, кроме того, и реакцией лазера на внезапное изменение оптической длины измерительного резонатора, то есть скоростью, с которой интенсивность излучения лазера достигает нового равновесного уровня. Ограниченность быстродействия приводит к тому, что при высокой скорости изменения плотности амплитуда модуляционных циклов значительно уменьшается. Исследования быстродействия трехзеркального интерферометра на частотах изменения интерференционных циклов, достигающих 1 МГц, в наших условиях оказались технически невыполнимы. Все же, в результате сравнения интерферограмм трехзеркального интерферометра с интерферограммами интерферометров Маха-Рождественского и Майкельсона, полученных на индукционном разряде, можно утверждать, что быстродействие схемы является удовлетворительным при изменении интерференционных циклов с частотой, достигающей 1 МГц.

У. В итоге проведенной работы можно сделать следующие выводы:

1. Схемы интерферометров с субмиллиметровым лазером могут быть использованы для определения плотности плазмы в лабораторных установках. Для полного перекрытия диапазона измеряемых плотностей $10^{13} - 10^{16} \text{ см}^{-3}$ необходимо, чтобы температура электронов плазмы с плотностью, большей чем 10^{15} см^{-3} , была выше 10 эВ.

2. Так как эффективная частота соударений в плазме с плотностью $10^{14} - 10^{16} \text{ см}^{-3}$ в основном определяется электронно-ионными соударениями и экспериментально наблюдается значительное поглощение субмиллиметрового излучения плазмой с температурой электронов 0,1 - 10 эВ, то данные схемы интерферометров позволяют проводить измерения частоты соударений и температуры электронов.

3. При использовании методов абсолютной калибровки амплитуды интерференционных циклов, имеется возможность расширить нижний предел измеряемых плотностей. В условиях нашей работы нижний предел измерения фазы определялся величиной $2\pi/36$.

4. Данные схемы интерферометров обладают лучшей виброустойчивостью по сравнению с интерферометрами оптического и ближнего инфракрасного диапазона.

5. Применяя в схемах собирающие линзы из фторопласта IV при вводе излучения в разрядные камеры, можно достичь лучшего пространственного разрешения по сравнению с СВЧ-методами.

6. Интерферометры также могут быть использованы для определения параметров квазистационарной плазмы.

Л И Т Е Р А Т У Р А

1. Гинзбург В.Л. Распространение электромагнитных волн в плазме. М., Физматгиз, 1960.
2. Дюбо С.Ф., Свич В.А., Валитов Р.А. Субмиллиметровый газовый лазер непрерывного действия. - "Письма в ЖЭТФ" 6, вып. 3, 1967, 567.
3. Дюбо С.Ф., Ефименко М.Н. Детектирующие свойства точечного контакта металлы - *InSb* на волне 337 мкм при $T = 300 \text{ К}$. - "Письма в ЖЭТФ", 13, 1971, 531.

4. Ashby D.E.T.F., Jephcott D.F. Measurement of plasma density using a gas laser as an infrared interferometer. - "Applied Physics Letters", 3, 1963, 13.
5. Gerardo I.B., I.T.Verdeyen. Utilization of transverse modes in the spherical laser interferometer. - "J.Nucl. Energy", Pt.C.7, 1965, 475.
6. Hooper E.B.Jr., Beketi G. A laser interferometer for repetitively pulsed plasmas. - "Applied Physics Letters" 7, 1965, 133.
7. Бережный В.Л., Душин Л.А., Кононенко В.И. - В кн.: "Физика плазмы и проблемы управляемого термоядерного синтеза". Вып. I, Киев, "Наукова думка", 1971, 197.



Ответственный за выпуск В.А.БЕРЕЖНЫЙ

Подписано к печати 4 декабря 1974 г., Т-18164, формат 60x84/16,
1,5 л.л., зак. 29, тир. 250. Цена 15 коп. Харьков-108, роталпринт
ФТИ АН УССР.