

возможность определить n_e , v_e (частоту столкновения электронов с тяжёлыми частицами), а в оптич. диапазоне и концентрацию нейтральных атомов. Методика основана на зависимости *диэлектрической проницаемости* плазмы от частоты:

$$\epsilon = \text{Re} \epsilon + i \text{Im} \epsilon = 1 - \frac{\omega_p^2}{\omega^2} \left(1 + i \frac{v_e}{\omega} \right) = 1 - \frac{n_e}{n_c} \left(1 + i \frac{v_e}{\omega} \right),$$

$n_c = m \omega^2 / 4 \pi e^2$ — критич. концентрация, при к-рой $\omega = \omega_p$ и $\text{Re} \epsilon = 0$. При $\omega > \omega_p$ сигнал проходит через плазму, при $\omega < \omega_p$ происходит отражение волн (т. н. о т с е ч а). Это первый простейший метод оценки концентрации плазмы. Он используется при зондировании ионосферы, а также в лабораторных исследованиях. Широкое применение в исследованиях, особенно нестационарной плазмы, получили и н т е р ф е р о м е т р и ч е с к и е м е т о д ы, основанные на зависимости разности фаз между опорным излучением и излучением, прошедшим через плазму, от плотности плазмы.

Если $n_e < n_c$ и длина волн $\lambda \ll \Lambda$ — характерного размера неоднородности, то $\text{Re} \epsilon$ определяет разность фаз волны, прошедшей через плазму, и опорной:

$$\frac{\delta \varphi}{2\pi} = \frac{1}{2} \frac{\langle n_e \rangle l}{n_c \lambda}; \quad \langle n_e \rangle = \frac{1}{l} \int_0^l n_e dx,$$

l — длина зондирования. Мнимая часть $\text{Im} \epsilon$ определяет экспоненциальное затухание волны с коэф. $\alpha = v_e / c \sqrt{1 - n_e / n_c}$, откуда вычисляется v_e . Так могут быть определены средняя по лучу зондирования концентрация и частота столкновений v_e . Для восстановления профиля $n(r)$ необходимо обратное интегральное преобразование.

Диапазон частот, используемых для интерферометрич. измерений, ограничен, с одной стороны, условием распространения волн $\omega > \omega_p$, а с другой — мин. измеряемым сдвигом фаз. При плотностях плазмы $n \leq 10^{14} \text{ см}^{-3}$ используют СВЧ-диапазон. В этом диапазоне существует неск. интерферометрич. схем: локация в свободном пространстве, волноводный, резонаторный методы (по изменению сдвига резонансной частоты).

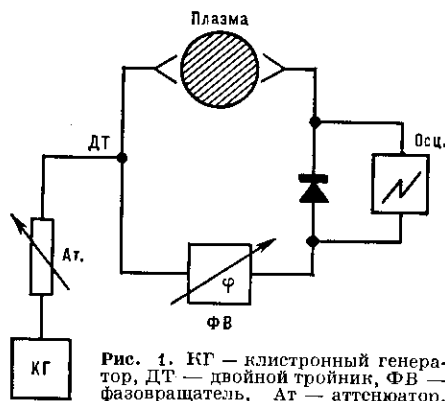


Рис. 1. КГ — клистронный генератор, ДТ — двойной тройник, ФВ — фазовращатель, Ат — аттенюатор.

Простейшая схема первого способа приведена на рис. 1. Прошедший через плазму сигнал сравнивается с опорным сигналом на детекторной головке.

Для плотных плазм ($n_e > 10^{16} - 10^{17} \text{ см}^{-3}$) может использоваться оптическая лазерная интерферометрия. При определении концентрации атомов её чувствительность поднимается на 6—10 порядков для тех атомов, для к-рых есть близлежащие к частоте зондирующего луча резонансные переходы. В качестве источника света в оптич. интерферометрии применяются рубиновые, гелий-неоновые и др. лазеры, в разл. оптич. схемах — *интерферометры Майкельсона*, Маха—Цендера и др.

При фотоаграфич. регистрации интерферограммы можно с помощью преобразования Абеля получить мгновенный профиль концентрации. Фотоэлектрич. методы регистрации позволяют проводить анализ последовательно.

Лазерная Д. п. Д. п. по рассеянию волн на свободных электронах развита в результате использования лазерной техники. Классич. (томсоновское) сечение рассеяния на свободных электронах имеет вид: $S_T = \int \sigma d\Omega = \frac{8}{3} \pi r_0^2$, где $r_0 = e^2 / mc^2$ — клас-

сич. радиус электрона, Ω — телесный угол. Изменение частоты излучения при рассеянии на электроне, движущемся со скоростью v , определяется эффектом Доплера: $\Delta \omega = \Delta k \cdot v$, где $\Delta k = 2k \sin(\varphi/2)$; φ — угол рассеяния, k — волновой вектор зондирующей волны. Если $\Delta k r_D \gg 1$ (r_D — *дебаевский радиус экранирования*), то плазменные эффекты несутся. Рассеяние от отдельных электронов суммируется, частотный спектр рассеянного излучения определяется распределением скоростей электронов и при максвелловском распределении оказывается гауссовым (при $T_e \leq 0,5 \text{ кэВ}$):

$$I(\omega) \sim n_e \exp \times (-m_e \Delta \omega^2 / 2 \Delta k^2 T_e).$$

Т. о., измерения $I(\omega)$ позволяют определить T_e и n_e . Наблюдение под большим углом к падающему лучу ($\sim \pi/2$) обеспечивает локальность методики — рассеянное излучение фиксируется приёмной аппаратурой из элемента объёма, определяемого пересечением поля зрения системы регистрации и канала пучка (рис. 2).

В магн. поле, если угол между k и напряжённостью магн. поля $H \rightarrow \pi/2$, спектр рассеяния состоит из узких пиков, частотный интервал между к-рыми равен Ω_e , а огибающая имеет вид гауссовой кривой с $T_e = T_{e1}$. На этом эффекте основаны предложения по измерению магн. поля в плазме. По сдвигу частоты $\omega_{\text{макс}}$ в рассеянном спектре, обусловленном эффектом Доплера, можно определять ср. направленную скорость электронов.

Д. п. по коллективному (когерентному) рассеянию. В плотной плазме при $\Delta k r_D \ll 1$ преобладающим оказывается рассеяние на крупномасштабных (по сравнению с r_D) тепловых и нетепловых колебаниях и флуктуациях плотности плазмы (зарядов Z). В случае тепловых флуктуаций интенсивность рассеяния может превысить томсоновскую в Z раз, в контуре линии возникает острый пик. На этом основываются предложения по измерению ионной темп-ры. В плазме с высоким уровнем надтепловых флуктуаций рассеяние определяется этими колебаниями. Исследование зависимости $\Delta \omega(\Delta k)$ позволяет определить амплитуды и дисперсионные характеристики нетепловых колебаний в плазме.

Такого рода эксперименты в основном реализуются с применением лазеров. Возможны они и в СВЧ-диапазоне, хотя трудны как из-за малой эффективности рассеяния, так и из-за недостаточной монохроматичности генераторов.

Д. п. с помощью резонансной флуоресценции основана на определении интенсивности излучения резонансно возбуждённых атомов и ионов под действием внеш. источника. Процесс можно рассматривать как рассеяние излучения на частоте, близкой к резонансной одного из атомных переходов. При достаточной интенсивности зондирующего излучения происходит насыщение эффекта флуоресценции. Зная атомные константы, можно определить концентрацию флуоресцирующих компонент. Диагностика локальна, т. к. наблюдение ведётся под большим углом к зондирующему лучу.

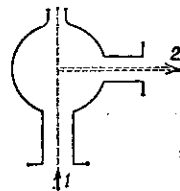


Рис. 2. 1 — падающий луч, 2 — рассеянный луч.