

В настоящем описании содержатся сведения, необходимые для выполнения лабораторных работ по исследованию плазмы "метод зондов" и "исследование Функции распределения электронов в плазме". Описание состоит из трех частей:

- 1) общего для этих двух лабораторных работ теоретического введения.
- 2) описания установки и задания к работе "метод зондов".
- 3) части, относящейся к работе "исследование функции распределения электронов в плазме".

Теоретическая часть

§1. Плазма.

Ещё в далекой древности люди считали, что мир состоит из четырех стихий: земли, воды, воздуха и огня. Такое деление всего сущего по современным представлениям соответствует четырем состояниям вещества: твердому, жидкому, газообразному и плазменному. Порядок перечисления их не случаен: он соответствует "степени свободы" движения микроскопических частиц. Так, в твердом теле атомы и молекулы могут лишь совершать колебания вблизи некоторых точек - узлов кристаллической решетки. В жидкости они уже могут произвольно перемещаться в любом направлении, но свобода их ограничена тем, что в движении молекулы постоянно испытывают действие сил

межмолекулярного взаимодействия. В газе расстояния между частицами в среднем много больше, чем характерные радиусы действия сил взаимодействия. Большую часть времени частицы перемещаются свободно, испытывая воздействия других частиц только в течение относительно коротких промежутков времени при случайном сближении (в таких случаях говорят, что частицы испытывают столкновения). До тех пор, пока энергии, которые частицы могут передавать друг другу при столкновении малы, заряженные частицы (электроны, ядра) составляющие нейтральные атомы и молекулы, не могут их покинуть. При увеличении средней кинетической энергии частиц (при увеличении температуры газа) некоторая часть особенно быстрых частиц оказывается способной передавать при столкновениях энергию, достаточную для отделения электронов от атомов (молекул) - энергию ионизации. В газе начинают в заметных количествах рождаться отрицательно и положительно заряженные частицы - электроны и ионы. Газ становится ионизированным, он переходит в плазменное состояние.

Видно, что между газом и плазмой нет резкой границы. Во многих отношениях плазма ведет себя так же, как и газ. Она, например, подчиняется газовым законам (в области их применимости). Однако, у плазмы имеются и специфические свойства: , остановимся только на трех из них.

1. Газ состоит из нейтральных частиц, поэтому ни магнитное, ни электрическое поля не влияют на их движение, и, следовательно, не изменяют состояние

газа. При приложении к плазме электрического и магнитного полей движение заряженных частиц изменяется (упорядочивается), и плазма проявляет свои замечательные свойства.

Благодаря высоким концентрациям свободных заряженных частиц, плазма является хорошим проводником электрического тока. В отличие от металлов, для которых в широких пределах выполняется закон Ома, проводимость плазмы сильно зависит от внешних условий, например, напряжения. Нелинейность зависимости тока от напряжения в плазме широко используется современной наукой и техникой; с ней мы ещё встретимся и в нашей лабораторной работе.

Магнитное поле также сильно влияет на движение частиц в плазме. В результате плазму можно сдерживать магнитной "стенкой", толкать магнитным "поршнем", запереть в магнитной "ловушке". Имеющиеся в распоряжении человека твердые тела плавятся при температурах, меньших 3000-4000 К. Возможность изоляции плазмы от стенок магнитным полем и бесконтактного её нагрева позволяет получать температуры, недостижимые в обычных условиях.

2. Важнейшим свойством плазмы является её квазинейтральность. Состоящая из заряженных частиц плазма оказывается нейтральной в среднем в достаточно больших объемах и за достаточно большие промежутки времени. Это свойство плазмы связано с тем, что всякое разделение зарядов приводит к появлению электрического поля, которое вызывает появление электрического тока, выравнивающего возникшее

разделение зарядов. Указанный механизм приводит к тому, что плазма активно препятствует проникновению внешнего электрического поля, создавая на границах раздела слои объемного заряда, в которых в основном и локализуется прикладываемое извне поле.

3. Движение частиц в газе ограничивается только упругими столкновениями их между собой и со стенками. Поэтому, если всем частям ограничивающей газ поверхности придать одинаковую температуру, то состояние газа будет полностью определяться заданием его химического состава, давления и температуры. Столкновения частиц в плазме поражают своим многообразием, ибо энергии поступательного движения частиц велики и при столкновениях могут возбуждаться внутренние степени свободы и даже рождаться новые частицы: атомы и свободные радикалы (при диссоциации молекул электронным ударом), электроны и ионы (при ионизации). В результате в плазме могут происходить сложные химические реакции, которые не идут в обычных условиях. Этим занимается специальная область науки - плазмохимия.

В отличие от газов, в плазме как правило, отсутствует термодинамическое равновесие. Грубо говоря, различные частицы плазмы во многом живут своей собственной, обособленной жизнью. Это и приводит к тому, что для характеристики состояния плазмы приходится использовать довольно много параметров. Кроме давления, необходимо знать пространственные распределения напряженностей электрического и магнитного полей, концентрации различных

частиц: электронов, ионов, атомов и молекул, находящихся в основном и различных возбужденных состояниях, а для каждого сорта частиц - функцию распределения по скоростям (см. ниже).

Разработкой методов и измерением параметров плазмы занимается отдельная область физики плазмы - диагностика плазмы.

Цель настоящей лабораторной работы - ознакомиться с одним из важнейших направлений диагностики плазмы - применением электрических зондов. Среди различных применений зондов основным является получение информации об электронном компоненте плазмы газовых разрядов пониженного давления.

§2. Несколько слов о газовом разряде.

Газовым разрядом принято называть совокупность электрических, магнитных, оптических, химических и акустических явлений, сопровождающих прохождение тока через газ. Это основной способ получения плазмы в науке и технике, интересное и часто очень красивое физическое явление. Один и тот же газ при разных токах и (или) давлениях может иметь различные цвета, свечение может быть неоднородным как по радиусу, так и по длине цилиндрической разрядной трубки. До сих пор полностью не изучены, например, такие явления, как контракция (отрыв разряда от сте-

нок трубки и превращение его в тонкий светящийся шнур) и страты (чередование светящихся слоев и темных промежутков вдоль оси трубки).

В этом параграфе кратко рассматриваются основные типы разрядов в газе - темный (таунсендовский), тлеющий и дуговой.

Представим себе следующий опыт. Возьмем небольшую стеклянную трубку, из которой удален воздух. Трубка содержит какой-нибудь газ и два впаянных электрода - анод и катод. Приложим к ним некоторую разность потенциалов. Так как газовый разряд имеет вольт - амперную характеристику с падающими участками, необходимо ограничивать максимальный разрядный ток "балластным" сопротивлением, включенным последовательно с разрядной трубкой, тем самым предохраняя источник тока от перегрузки.

Выставим сопротивление балластного реостата R достаточно большим, а напряжение в цепи - равным нескольким сотням вольт. Будем уменьшать R и следить за током в цепи и напряжением на трубке. Сначала, при больших R ток очень мал (доли $Мка$), свечения не видно. Такой разряд называется темным, таунсендовским, или несамостоятельным, так как ток переносится заряженными частицами, которые не обязаны своим происхождением самому разряду. Это либо случайно образовавшиеся пары ионов (таковые всегда в не боль том количестве есть в газах), либо возникшие под действием каких-либо ионизирующих излучений.

При уменьшении R разряд вдруг загорается и теперь называет тлеющим разрядом. Напряжение на

трубке - сотни вольт, токи - порядка нескольких миллиампер. Основные переносчики тока - электроны, образовавшиеся в результате вторичной электронной эмиссии катода и ионизации атомов газа электронными ударами в объеме.

При дальнейшем уменьшении R сила тока будет постепенно увеличиваться, пока не наступит новое превращение; разряд перейдет в дуговой. При этом сила тока резко увеличится, достигнув величин долей, единиц, а при достаточной мощности источника и прочности установки - десятков, сотен и более ампер. Напряжение на разрядном промежутке уменьшится до нескольких единиц или десятков вольт. Хорошая электропроводность дуги обычно поддерживается за счет высокой температуры катода, бомбардируемого ионами вследствие интенсивной термоэлектронной эмиссии.

Бывают так называемые дуги с холодным катодом. В этом случае источником мощной электронной эмиссии является небольшое ярко светящееся пятнышко на катоде. Считается, что оно образуется из-за чрезвычайно сильной напряженности электрического поля вблизи катода, вызывающей мощную автоэлектронную эмиссию (т.е. вырывание электронов из катода электрическим полем). Для облегчения зажигания такого разряда катоды покрывают материалами (оксидами определенных металлов), уменьшающие работу выхода электрона из катода.

Тлеющий и дуговой разряды имеют сходные черты. В обоих случаях вблизи катода есть так называ-

емое катодное темное пространство, в котором электроны, эммитированные катодом, ещё не набрали кинетическую энергию, достаточную для возбуждения атомов газа. Почти всю длину трубки от катодного темного пространства до анода занимает так называемый положительный столб - яркая и часто наиболее важная область разряда.

§3. Электрические зонды.

Особый интерес к электронам связан с тем, что обычно они получают от электрического поля почти всю энергию, вводимую в плазму, а затем распределяют её среди различных частиц плазмы. Свойства электронного газа определяют многие свойства плазмы, поскольку столкновения с электронами определяют основные физические процессы: возбуждение, диссоциацию, ионизацию и рекомбинацию.

По существующим представлениям электрон не имеет внутренней структуры, поэтому для характеристики электронов достаточно задать функцию распределения их по скоростям: (ФРЕС)

$$f(\vec{V}) = f(V_x, V_y, V_z)$$

под которой будем понимать число частиц в единице объема, имеющих проекции скоростей в некоторой декартовой системе координат в интервалах

$$V_x \div V_x + dV_x \quad V_y \div V_y + dV_y \quad V_z \div V_z + dV_z$$

Если плазма изотропна (все направления в ней равноправны), то $f(\vec{V})$ зависит только от модуля скорости, и можно ввести Функцию распределения электронов по энергиям (ФРЭЭ) $F(\varepsilon)$ обозначающую число частиц в единице объема, имеющих кинетическую энергию $\varepsilon = \frac{mV^2}{2}$ в интервале $\varepsilon \div \varepsilon + d\varepsilon$. Как известно, при термодинамическом равновесии устанавливается максвелловское распределение частиц по энергиям

$$F(\varepsilon) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \frac{N\sqrt{\varepsilon}}{(KT)^{\frac{3}{2}}} \exp\left(-\frac{\varepsilon}{KT}\right) \quad (1)$$

где $N = \int_0^\infty F(\varepsilon)d\varepsilon$ - полная концентрация частиц, T - их температура, K - постоянная Больцмана.

Плазма газовых разрядов пониженного давления далека от равновесия. Поэтому, например, для электронов плазмы формула (1), как правило, неприменима. Дело в том, что максвелловское распределение характерно для замкнутой системы частиц. Иными словами, для его осуществления для электронного газа необходимо, чтобы частота столкновений электронов друг с другом была бы много большей частот столкновений их со стенками и с другими частицами. Следует заметить, что вероятность межэлектронных столкновений сильно уменьшается при возрастании их скорости (формула Резерфорда), поэтому при больших энергиях отступления от формулы (1) могут быть значительны.

Интересным проявлением неравновесности электронного газа является так называемый отрыв средней энергии электронов ($1\text{эВ} = 11600 \text{ К}$) от средней

энергии (температуры) тяжелых, частиц (300 К). Для понимания этого факта достаточно вспомнить, что масса электрона в 1836 раз меньше массы самого легкого иона (протона), и принять во внимание, что при упругом столкновении частиц, сильно различающихся по массе, обмен кинетической энергии оказывается очень слабым (следствие закона сохранения полного импульса).

Основы метода зондов были заложены в начале 20-х годов XX в. одним из основателей физики плазмы, известным американским ученым, лауреатом Нобелевской премии Ирвингом Ленгмюром. Поэтому электрические зонды, используемые для диагностики плазмы, часто называют также ленгмюровками.

Вообще любое тело, в том числе и проводник, находящееся в соприкосновении с плазмой, принимает потенциал, несколько отличный от потенциала пространства V_3 . Происходит это по следующей причине: вследствие большой разницы в массах электроны и положительные ионы в разряде обладают сильно отличающимися подвижностями. Подвижность электронов гораздо больше подвижности ионов. Это ведет к тому, что в первый момент тело, помещенное в разряд, заряжается отрицательно, причем между плазмой и телом устанавливается такая разность потенциалов (своего рода контактная разность потенциалов), которая препятствует попаданию электронов на поверхность помещенного тела и увеличению поверхностного отрицательного заряда. При этом полный ток, идущий на тело, становится равным нулю: в еди-

ницу времени на него приходит одинаковое количество положительных ионов и электронов.

Из сказанного ясно, что простой зонд в соединении с электрическим вольтметром или электрометром не может служить для определения потенциала плазмы в точке нахождения зонда. Ленгмюр предложил снимать вольтамперную характеристику зонда (зависимость тока на зонд) от потенциала зонда и показал, как исследование этой характеристики может дать сведения не только о потенциале плазмы в исследуемом месте, но и о концентрации заряженных частиц и о температуре электронов.

Одно из основных положений зондового метода - допущение о том, что возмущение, вносимое зондом, локализуется в основном вблизи зонда, так что он слабо влияет на состояние плазмы, расположенной на некотором удалении от поверхности зонда. Такая локализация возмущения обусловлена тем, что зонд окружен слоем заряженных частиц, которые и экранируют его от остального объема (рис.1).

Полный ток на зонд складывается из электронного и ионного токов. Вольтамперная характеристика зонда (зондовая характеристика) представляет собой зависимость полного тока на зонд от потенциала зонда. Ее общий вид представлен на рис.2.

Качественное истолкование характеристики производится следующим образом: при больших отрицательных потенциалах зонда весь ток на него есть ток положительных ионов (участок АВ). При уменьшении отрицательного потенциала на ионный ток наклады-

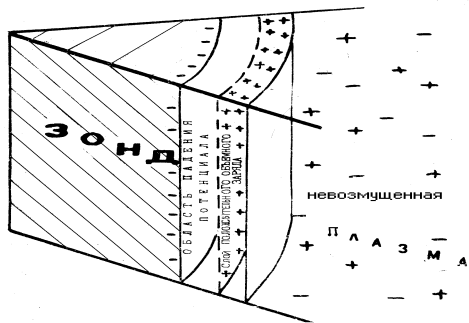


Рис. 1.

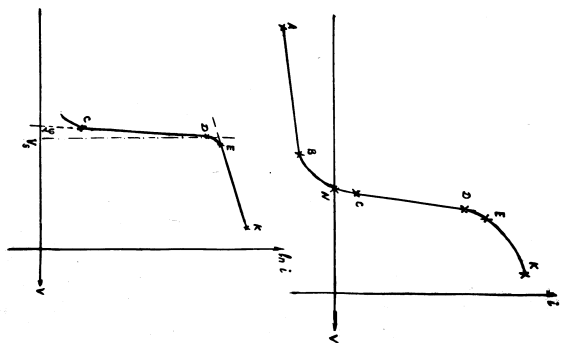


Рис. 2.

вается электронный ток, вызванный быстрыми электронами, энергия которых достаточна для преодоления задерживающего поля зонда. Этим наложением и объясняется быстрое уменьшение величины тока и последующее изменение его знака на участке ВС при потенциалах, еще значительно более низких, чем потенциал пространства. По мере уменьшения отрицательного потенциала зонда ток быстро растет по абсолютной величине, что связано с уменьшением задерживающего поля у зонда. Уже в этой области (СД) электронный ток значительно превышает ионный. Когда поле, задерживающее электроны, исчезает и превращается в ускоряющее, закон возрастания электронного тока изменяется. Это проявляется в более или менее резком изломе характеристики вблизи потенциала пространства (участок ДЕ).

Видно, что зондовая характеристика несет информацию о свойствах электронного газа, поэтому при наличии соответствующей теории, дающей связь этой характеристики с параметрами электронного газа, измерение вольтамперной характеристики оказывается мощным средством диагностики плазмы.

Для определения параметров плазмы в большинстве случаев пользуются электронной частью характеристики (участок СЕ). В этой области ток на зонд практически совпадает с электронным током. Если предположить, что:

- 1) плазма однородна и изотропна,
- 2) длина свободного пробега электронов много больше толщины призондового слоя (так что электро-

ны на пути из невозмущенной плазмы не испытывают столкновений)

3) зонд имеет выпуклую форму, полностью поглощает все попадающие на него электроны, а эмиссия заряженных частиц с его поверхности пренебрежимо мала, то ток на зонд не зависит от распределения потенциала в окрестности зонда и полностью определяется значением потенциала на его поверхности.

Выражение для плотности тока в этом случае имеет вид:

$$J_e = \frac{e}{2\sqrt{2m}} \int_{eU}^{\infty} \frac{(\varepsilon - eU)F(\varepsilon)}{\sqrt{\varepsilon}} d\varepsilon \quad (2)$$

где J_e - плотность электронного тока на анод, V - потенциал зонда относительно плазмы, а $F(\varepsilon)$ - ФРЭЭ, нормированная на концентрацию следующим образом:

$$n_e = \int_0^{\infty} F(\varepsilon) d\varepsilon \quad (3)$$

где n_e - концентрация электронов (число электронов в единице объема).

При максвеловском распределении электронов плотность электронного тока на зонд:

$$J_e = \frac{n_e e V_e}{4} \exp\left(-\frac{eU}{KT_e}\right) \quad (4)$$

где

$$V_e = \sqrt{\frac{8KT_e}{\pi m}} \quad (5)$$

средняя скорость электронов, а T_e - их температура.

Из формулы (4) видно, что если отложить значение тока на зонд, как функции потенциала зонда, в полулогарифмическом масштабе, то при максвелловском распределении электронов по энергиям, в области СД зондовой характеристики мы получим прямолинейный участок. В этом случае температура электронов может быть определена по наклону этого прямолинейного участка по формуле:

$$T_e = \frac{e}{K} Ctg(\varphi) \quad (6)$$

где φ - угол наклона прямолинейного участка к оси абсцисс.

Место излома полулогарифмической характеристики определяет значение потенциала пространства U_s . Так как часто излом характеристики является недостаточно резким, Ленгмюр предложил определять потенциал пространства по пересечению асимптот участков СД и ЕК (см. рис.1).

Значение зондового тока при потенциале позволяет найти концентрацию электронов в невозмущенной плазме. Из формулы (4) при $U = 0$ следует:

$$n_e = \frac{4i_0}{e\bar{V}_e S} \quad (7)$$

где i_0 - ток на зонд при потенциале зонда, равным потенциалу пространства, S -плотность поверхности зонда, e - заряд электрона. В настоящей работе требуется определить температуру и концентрацию электронов в положительном столбе разряда в парах ртути. Измерения проводятся при двух значениях разрядного

тока в трубке (например, 100 и 200 мА) и на двух различных зондах. В каждом случае снимается зависимость полного тока на зондах от потенциала зонда относительно анода разрядной трубки. По полученным вольтамперным характеристикам определяется потенциал плазмы, концентрация и температура электронов. Концентрация заряженных частиц определяется как по электронной, так и по ионной части зондовой характеристики (см. ниже). Цель этой части работы состоит в сравнении полученными разными методами результатов.

В случае больших отклонений ФРЭЭ от максвелловской, участок СД уже не будет прямолинейным, и для определения средней скорости электронов необходимо будет знать вид функции распределения по энергиям.

§4. Определение параметров плазмы по ионной части зондовой характеристики

Если потенциал зонда достаточно отрицателен, то электроны практически не попадают на зонд. В этом случае ток в зондовой цепи будет ионным током насыщения. Теория ионного тока насыщения позволяет определить концентрацию ионов n_i , если известна средняя скорость электронов. Из условия квазинейтральности следует, что при заряде ионов, равным e

, концентрация электронов будет равна концентрации ионов.

Недостатком метода является его чувствительность к величине массы ионов. Если в плазме присутствуют ионы с различной массой, то для точного определения суммарной концентрации заряженных частиц необходимо знать относительные концентрации различных ионов. Другой недостаток метода - необходимость измерять довольно малые величины силы тока достигающие единиц и долей мкА.

Поэтому ионную часть характеристики используют в случае разрядов с большой плотностью тока, когда трудно получить электронную часть характеристики вследствие разогрева зонда (горячий зонд эмиттирует электроны), и в плазме, помещенной в магнитное поле, которое также сильно искажает электронную часть характеристики.

Найдем связь между величиной ионного тока насыщения и концентрацией ионов в плазме. Для этого рассмотрим движение ионов вблизи зонда. Оно определяется распределением потенциала, созданным самим зондом и пространственным зарядом вокруг него.

Изолированный зонд в плазме принимает такой потенциал, чтобы на него попадало лишь очень небольшое количество электронов; подавляющее их большинство должно задерживаться призондовым скачком потенциала (см. §3). Поэтому величина скачка U_{ck} может быть вычислена из условия полной остановки электрона, облающего начальной кинетической энер-

гией K_e и движущегося от плаз к зонду:

$$eU_{ck} = KT_e \quad (8)$$

В плазме средняя кинетическая энергия ионов кТ много меньше средней кинетической энергии электронов (см. §1), поэтому, подлетая к зонду, ионы ускоряются практически от нулевой начальной скорости до скорости порядка:

$$V_i = \sqrt{\frac{2eU_{ck}}{M}}$$

где M - масса иона. Как показывает строгое рассмотрение задачи, между внешней кромкой слоя пространственного заряда и невозмущенной плазмой образуется большая квазинейтральная область, в которую проникает поле зонда. В области квазинейтральности существует воображаемая поверхность, попав на которую, ион обязательно попадет на зонд. При этом поверхность заряженного слоя ионы проходят нормально, обладая энергией порядка KT_i .

Отсюда плотность тока однозарядных ионов на границе слоя пространственного заряда:

$$J_p = n_i e V_i = n_i e \sqrt{\frac{2KT_e}{M}} \quad (9)$$

а ток на цилиндрический зонд длиной L (r_s - радиус внешней границы пространственного заряда)

$$i_p = 2\pi r_s l e n_i \sqrt{\frac{2KT_e}{M}} \quad (10)$$

строгое решение задачи приводит к равенству:

$$i_p = 0,4\pi 2r_s l n_i \sqrt{\frac{2KT_e}{M}} \quad (11)$$

из которого выражая все величины в удобных единицах измерения получим:

$$n_i [\text{см}^{-3}] = 2,4 \cdot 10^{11} \frac{\sqrt{\mu[a.e.M]} i [MA]}{r_s [MM] l [MM] \sqrt{\bar{\epsilon}} [\text{ЭВ}]} \quad (12)$$

где μ - масса иона в атомных единицах массы, $\bar{\epsilon}$ - средняя энергия электронов в электронвольтах.

Для определения r_s используется "закон трех вторых", эля электрода циклической формы имеющей вид:

$$i_p = \frac{2\sqrt{2}}{9} \sqrt{\frac{e}{M}} \frac{l}{r_p} \frac{U^{\frac{3}{2}}}{\beta^2(r_s/r_p)} \quad (13)$$

где r_p - радиус зонда, U - потенциал зонда относительно плазмы, а $\beta(r_s/r_p)$ - некая определенная функция, не выражающаяся через элементарные.

В практических единицах измерения из (13) получаем:

$$\beta^2(r_s/r_p) = 3,4 \cdot 10^{-4} \frac{l [MM] U^{\frac{3}{2}} [B]}{r_p [MM] \sqrt{\mu[a.e.M]} i [MA]} \quad (14)$$

Таким образом, обработки ионной части характеристики предлагается проводить в следующем порядке:

1. по экспериментальным данным из формулы (14) получить значение функции $\beta(r_s/r_p)$

2. по найденному значению функции $\beta(r_s/r_p)$ с помощью графика этой функции найти r_s .

3. по известной из обработки электронной части характеристики электронной температуры наденному r_s из формулы (12) получить концентрацию ионов. Полученную концентрацию сравнить с электронной концентрацией, найденно другими способами.

Лабораторная работа "метод зондов"

Задача лабораторной работы - исследование плазмы положительного столба тлеющего разряда в парах ртути при давлении порядка 0.001 мм.рт.ст, (давление насыщенных паров ртути при комнатной температуре) методом зондов Ленгмюра.

§1. Экспериментальная установка

Экспериментальная установка состоит из разрядной трубки, вакуумной системы (рис.3), схемы питания разряда и зондовой схемы (рис.4).

Форвакуумный насос создает разряжение, необходимое для работы диффузионного насоса. Диффузионный насос представляет собой ртутный насос Ленгмюра, поэтому он неспособен откачивать пары ртути, которые и попадают из насоса в разрядную трубку.

Схема питания разряда состоит из цепи накала и цепи анода.

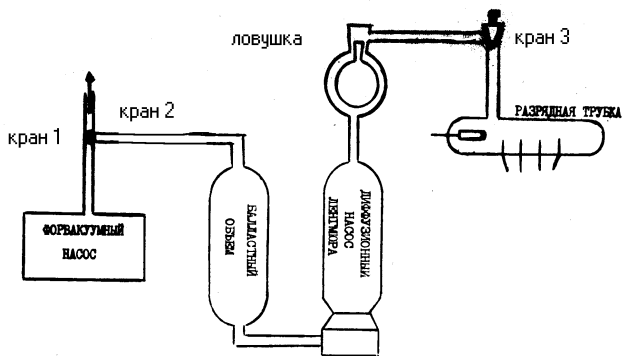


Рис. 3.

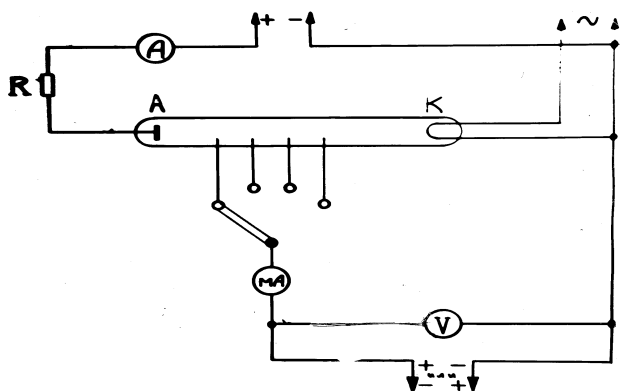


Рис. 4.

Зондовая схема предназначена для подачи на зонд регулируемого напряжения нужной полярности, измерения этого напряжения и измерения тока на зонд.

§2. Порядок работы

Проверку исходного состояния вакуумной системы производит лаборант. Включается вакуумная система в следующем порядке: закрывается кран на атмосферу (кран 1), включается двигатель форнасоса, когда колба насоса откачается до форвакуума (через 1 мин.), открывается кран на диффузионный насос. Перед включением диффузионного насоса необходимо включить водяное охлаждение насоса, если этого не сделать, насос лопнет!!! После пуска воды включается печь диффузионного насоса. Когда насос откачает себя до исчезновения свечения газа при включенном ВЧ-индукторе (т.е. через 5-10 мин.) открывают кран на разрядную трубку (кран 3) и проверяют вакуум в трубке. При проверке вакуума с помощью ВЧ - индуктора не следует прикасаться электродом индуктора непосредственно к стеклу, т.е. искра может пробить в стекле дырку! нельзя прикасаться включенным индуктором также к металлу, и, что особенно важно, к зонду. При включенном индукторе все зонды должны быть отключены от измерительной схемы, и все цифровые измерительные приборы отключены от сети 220 вольт.

В процессе работы диффузионный насос должен работать все время.

После зажигания разряда (производится лаборантом) требуется снять вольтамперные характеристики двух зондов при двух значениях разрядного тока. При снятии характеристик будьте внимательны, не выставляйте слишком большого положительного смещения зонда, так как при этом на зонд потечет слишком большой электронный ток, в результате чего зонд может сгореть.

После выполнения работы выключите электрические цепи разряда и зонда. Выключение вакуумной системы производится лаборантом.

§3. Требования к отчету

Отчет должен содержать:

1. Схему для проведения исследования по методу зондов.

2. Вольтамперная характеристики зондов, отложенные в линейном и полупологарифмическом масштабе.

3. Таблицы значений концентрации заряженных частиц, электронной температуры и потенциала пространства, найденные по снятым характеристикам. При нахождении температуры использовать метод наименьших квадратов (по крайней мере для двух кривых).

Используя полученные значения потенциала пространства для разных мест положительного столба (разные зонды), оценить напряженность электрического поля в нем.

4. Оценки погрешностей намеренных величин.

Лабораторная работа "Исследование функции распределения электронов в плазме"

Часть III содержит описание метода измерения функции распределения электронов по энергиям в газоразрядной плазме (метод Дрювестена) и описание экспериментальной установки для этой лабораторной работы.

§1. Измерение функции распределения электронов по энергиям

Если продифференцировать выражение для зондового тока (2) по потенциалу U то легко увидеть, что:

$$F(\varepsilon)|_{\varepsilon=eU} = \frac{2\sqrt{2}}{9} \sqrt{\frac{m}{e}} \sqrt{U} \frac{d^2 J_e(U)}{dU^2} \quad (15)$$

Эта формула (правда, только для сферического зонда) была известна ещё И. Ленгмюру, однако в литературе она чаще всего называется формулой Дрювестейна, по фамилии ученого, впервые использовавшего её для определения ФРЭЭ. Зная вторую производную электронного тока на зонд, можно найти ФРЭЭ в невозмущенной плазме. Так как при отрицательных

потенциалах зонда ионы движутся в ускоряющем поле, а электроны в задерживающем, и следовательно, в этой области ионный ток меняется гораздо медленнее электронного, вторая производная полного тока практически совпадает со второй производной электронного тока.

Среди различных методов нахождения второй производной полного тока наиболее распространенным является наложение на постоянный потенциал зонда U малой переменной добавки $u(t)$. В линейных электрических цепях ток всегда пропорционален напряжению (закон Ома). Зондовая характеристика, как уже говорилось, существенно нелинейна. Поэтому, если напряжение зонд-плазма изменяется во времени по закону:

$$U(t) = U + u(t) \quad (16)$$

зависимость зондового тока от времени имеет существенно более сложный, чем (2), характер. Эту зависимость можно представить в виде ряда Тейлора по малому параметру $u(t)$ в виде:

$$i(U(t)) = \sum_{n=0}^{\infty} \frac{d^n i(U)}{dU^n} \frac{[u(t)]^n}{n!} \quad (17)$$

Наиболее распространенный в настоящее время метод дифференцирования $i(U)$ был предложен в 1953 году сотрудниками кафедры оптики физического факультета ЛГУ Г.М. Малышевым и В.Л. Федоровым. Он состоит в наложении дифференцирующего сигнала вида

$$u(t) = A(1 + \cos(\omega_1 t) \sin(\omega_2 t)) \quad (18)$$

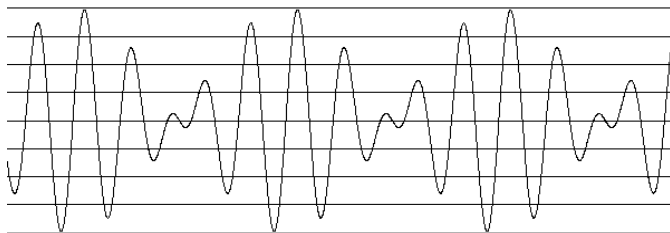


Рис. 5.

при $\omega_2 \gg \omega_1$ и измерении амплитуда переменной составляющей зондового тока на частоте ω_1 . Вид дифференцирующего сигнала (18) показан на рис.5.

В этом случае (17) имеет вид:

$$i(U(t)) = [i(U) + \frac{3}{8}A^2 \frac{d^2 i(U)}{dU^2}] + \quad (19)$$

$$[\frac{A^2}{2} \frac{d^2 i}{dU^2} + \frac{7}{64}A^4 \frac{d^4 i}{dU^4} + \dots] \cos(\omega_1 t) + \sum$$

где \sum - сумма убывающих по амплитуде гармоник кратных и комбинационных частот. Из формулы (19) видно, что гармоника зондового тока на частоте ω_1 имеет в качестве главного члена амплитудного ряда величину, пропорциональную второй производной. При достаточно малой амплитуде дифференцирующего сигнала A вкладом более высоких членов ряда можно пренебречь, тогда

$$F(\varepsilon)|_{\varepsilon=eU} = \frac{4\sqrt{2}}{e^2} \sqrt{\frac{m}{e}} \sqrt{U} \frac{i_{\omega_1}}{SA^2} \quad (20)$$

где i_{ω_1} - амплитуда гармоники зондового тока на частоте ω_1 . Эта гармоника выделяется с помощью специаль-

ной узкополосной схемы, описание которой будет дано ниже. Важно подчеркнуть, что данный метод основан на существенной нелинейности вольтамперной характеристики промежутка зонд-невозмущенная плазма. Эта нелинейность приводит к тому, что частотный спектр напряжения (зависимость напряжения от частоты) уже не совпадает с частотным спектром зондового тока. Действительно, Формулу (18) нетрудно преобразовать к виду

$$u(t) = A[\sin \omega_2 t + \frac{1}{2}[\sin (\omega_2 + \omega_1)t + \sin (\omega_2 - \omega_1)t]] \quad (21)$$

То есть в спектре напряжения, кроме постоянной составляющей ($\omega = 0$), присутствуют всего три гармоники с частотами ($\omega_2 \pm \omega_1$). Спектр тока имеет, как это видно из формулы (19) заметно более сложный вид. В нем появляется добавка к постоянной составляющей и различные гармоники, амплитуды которых зависят от вида зондовой характеристики.

Таким образом, задача определения $F(\varepsilon)$ сводится к измерению i_{ω_1} при различных значениях потенциала U . При этом метод позволяет получать ФРЭЭ в абсолютной мере по формуле:

$$F(\varepsilon)|_{\varepsilon=eU}[\text{см}^{-3}\text{ЭВ}^{-1}] = 8,42 \cdot 10^{11} \frac{\sqrt{U}i_{\omega_1}}{A^2S} \left[\frac{\sqrt{BA}}{B^2\text{см}^2} \right] \quad (22)$$

§2. Описание экспериментальной установки.

Установка состоит из следующих частей:



Рис. 6.

1. Разрядная трубка с зондами,
2. Схема питания разрядной трубки,
3. Зондовая (измерительная) схема. Внешний вид установки изображен на рис.6.

К электрическим схемам может быть подключена любая из трех отпаянных, наполненных парами ртути люминесцентных трубок, укрепленных на раме 1. В каждой из трубок неподвижно укреплены три цилиндрических зонда, разнесенные вдоль оси трубки.

Схема питания разряда (рис.7) содержит стабилизированный источник питания ИП балластное сопротивление R_6 и амперметр А. Ток разряда регулируется изменением напряжения источника питания.

Зондовая цепь предназначена для того, чтобы подавать на зонд напряжение, представляющее собой

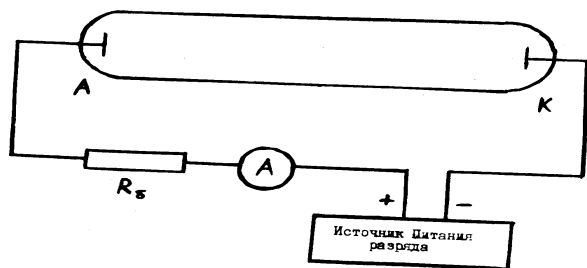


Рис. 7.

сумму постоянной добавки U и дифференцирующего сигнала $\Delta U(t)$ и измерять ток зонда и амплитуду гармоники зондового тока частотой ω_1 в зависимости от величины U . Часть элементов зондовой цепи находится в зондовом измерительном блоке ИБ, соединенном проводами и кабелями со всеми необходимыми приборами.

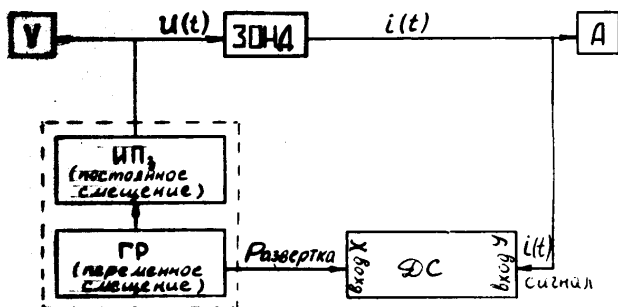
Рассмотрим работу зондовой цепи по функциональной схеме (рис.8). Соответственно двум слагаемым зондового напряжения, зондовая цепь содержит источник постоянного напряжения (ИП_з + генератор развертки ГР) и источник переменного напряжения (дифференцирующего сигнала) - генератор высокой частоты ГВЧ. Сигнал на выходе ГВЧ имеет форму (II), модулирующей сигнал вырабатывается генератором низкой частоты ГНЧ. Сигнал снимаемый с сопротивления $R_з$, пропорциональный току зонда, усиливается селективным (резонансным) усилителем РУ, настроенным на частоту ω_1 и подается на син-

хронный детектор СД. Синхронный детектор, на второй вход которого подается низкочастотный сигнал с ГНЧ, вырабатывает напряжение, пропорциональное амплитуде гармоника в входном сигнале, совпадающей с опорным сигналом, подаваемым с ГНЧ.

Это постоянное, а точнее, медленно меняющееся во времени синхронно с разверткой напряжение, пропорциональное $\frac{d^2i_z}{dU^2}$ подается на вход у двухкоординатного самописца ДС. На вход X подается напряжение развертки с генератора развертки. Таким образом, если схема настроена, самописец ДС будет выписывать кривую зависимости второй производной зондового тока по потенциалу зонда в зависимости от потенциала зонда. Кроме записи таких кривых, установка позволяет также измерять и записывать на самописце вольтамперные характеристики зондов. Для измерения напряжения на зонде (постоянной составляющей) служит цифровой вольтметр V_1 , а постоянной составляющей тока зонда - вольтметр V_2 , намеряющий падение напряжения на эталонном сопротивлении R_3 . Величина R_3 может быть установлена равной 1 Ком либо 10 ом $\pm 0,5\%$. $R_3 = 1$ Ком используется при записи на самописце ионной части зондовой характеристики, а $R_3 = 10$ ом - при записи электронной части характеристики.

Назначение элементов зондовой цепи, присутствующих на принципиальной схеме цепи (рис. 9), но отсутствующих на функциональной схеме, следующее: согласующие трансформатора Tr_1 и Tr_2 конденсатор С служат для отделения постоянной составляющей

А. Блок-схема зондовой цепи в режиме записи вольтамперной характеристики.



Б. Блок-схема зондовой цепи в режиме записи функции распределения

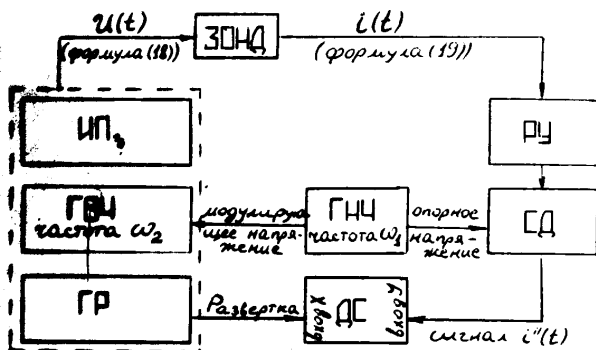


Рис. 8.

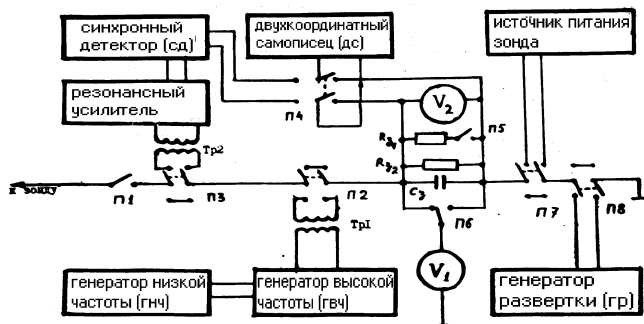


Рис. 9.

щей сигналов. Переключатели $\Pi_1 - \Pi_8$ служат соответственно для подключения зонда, ГВЧ и РУ к зондовой цепи, коммутации входа у самописца (подключает его либо к выходу СД, либо к эталонному сопротивлению R_3), переключения величины R_3 , переключения точки подключения вольтметра V_1 , подключения ИП и ГР к зондовой цепи.

Порядок выполнения работы

Во время работы на установке необходимо помнить следующее.

Легче всего испортить установку, подав на зонд неверное значение постоянного смещения, что вызовет большой ток на зонд, и зонд сгорит (разрушится).

Зонды накаляются докрасна (что недопустимо) при токе около 8 мА. Ни в коем случае не допускайте токов более 5 мА. Для этого следует придерживаться следующих правил:

1. Подключать зонд к зондовой схеме можно, только убедившись в том, что зонд имеет потенциал, отталкивающий электроны (то есть потенциал зонда ниже потенциала изолированного зонда), либо зная, что ток не превысит 5 мА.

2. В момент подключения зонда развертка должна быть либо отключена вовсе, либо должна быть достаточно медленной (период более 30 с); при этом потенциал зонда должен убывать от значения, соответствующего току 5 мА.

3. Переключать зонды, зажигать и гасить разряд можно только при отключенном зонде.

Другим тонким звеном установки является двухкоординатный самописец (см. Приложение 2), Его можно включать только после установления соответствующих входным сигналам чувствительностей входов. Если подать на вход самописца слишком большой сигнал чувствительные усилители постоянного тока самописца могут не выдержать. Поэтому не следует делать никаких переключений в схемах (кроме подключения зонда к измерительной схеме) при включенных кнопкой "ДВИГ" усилителях самописца.

Лабораторная работа состоит из следующих основных этапов:

1. Включение разряда
2. Настройка измерительной схемы по постоянному

току

3. Измерение вольтамперных характеристик зондов

4. Настройка измерительной схемы по переменному току

5. Измерение функций распределения электронов

6. Обработка полученных результатов и составление отчета
Рассмотрим смысл этих этапов по отдельности

1. Включение разряда

Для поджига газовых разрядов самостоятельного типа часто требуется как-то ионизировать ("пробить") разрядный промежуток; в дальнейшем при удалении источника ионизации нужная для горения разряда степень ионизации будет поддерживаться за счет самого разряда. Обычно разряд поджигают с помощью генератора Тесла, представляющего собой искровой разрядник. В настоящей экспериментальной установке Тесла-генератор неподвижно укреплен на стойке рядом с разрядными трубками (см. рис.6) и включается кратковременным нажатием на кнопку. Следует помнить, что Тесла-генератор создает интенсивные радиопомехи и наводит высокие напряжения в близкорасположенных проводниках. Это опасно для чувствительных полупроводниковых элементов приборов. При поджиге разряда все транзисторные приборы должны быть электрически отсоединены от разрядной трубки и выключены сетевыми выключателя-

ми, иначе транзисторы и микросхемы этих приборов могут сгореть.

2. Настройка измерительной схемы по постоянному току

Настройку схемы по постоянному току следует проводить независимо от того, требуется ли снимать вольтамперные характеристики зондов или же нужно измерить только функции распределения электронов.

Настройка заключается в установке оптимального постоянного смещения на зонде, амплитуды развертки и чувствительности усилителей самописца для того, чтобы:

1. не сжечь зонд и самописец
2. записать на самописце вольтамперные характеристики зондов в удобном для обработки масштабе по осям.

При переходе к другому разрядному току или к другой разрядной трубке настройку схемы по постоянному току следует проводить заново.

Прежде всего заметим, что при каком-либо фиксированном потенциале зонда, чем ближе зонд к катоду тем больший на него течет электронный ток (подумайте почему). Следовательно, если схема настроена по ближайшему к катоду зонду, то при подключении к схеме других зондов ток не будет превышать максимально допустимый.

Измерьте потенциал изолированного ближайшего

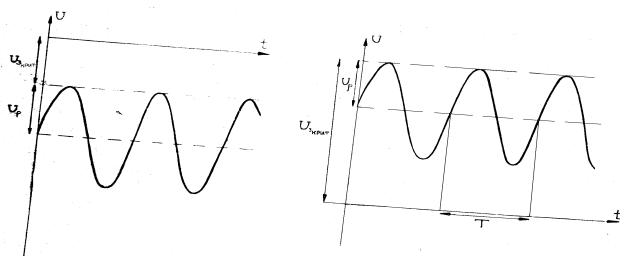


Рис. 10.

к катоду зонда. Отключив зонд, установите на источнике зондового смещения ИП_з, напряжение $U_{из}$ соответствующее этому потенциалу. Подключив зонд, убедитесь в отсутствии тока в зондовой цепи. Затем, измеряя напряжение зондового смещения на источнике ИП_з определите $U_{зкрит}$, соответствующее зондovому току 5 мА для этого, ближайшего к катоду, зонда. После этого установите рабочее зондовое смещение, для чего уменьшите $U_з$ от величины $U_{зкрит}$ на величину амплитуды развертки (указана в руководстве к лабораторной работе, выдаваемом в лаборатории). Тогда рабочее напряжение будет соответствовать формуле:

$$U_{зrab} = U_{из} - U_{разв}$$

, а зависимость $U_з$ от времени при включенной развертке будет выглядеть согласно рис.10, и все время оставаться меньше $U_{зкрит}$.

Включив развертку и самописец, убедитесь в том, что зондовый ток не превышает максимально допустимый, а кривая, вычерчиваемая самописцем, похо-

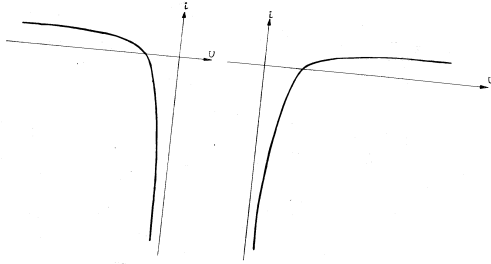


Рис. 11.

жа на вольтамперную характеристику зонда в плазме (рис.11).

3. Измерение вольтамперной характеристики зондов

Установив скорость развертки достаточно малой для того, чтобы самописец выписывал кривую без искажений, запишите вольтамперные характеристики различных зондов для данного разрядного тока.

4. Настройка измерительной схемы по переменному току

Не измеряя значений $U_{\text{раб}}$ и амплитуды развертки, переходим к настройке схемы по переменному току. Она включается в:

1. Согласовании частот ГНЧ и резонансного усилителя

2. Установке оптимальной формы и амплитуды дифференцирующего сигнала, вырабатываемого ГВЧ.

3. Настройке синхронного детектора, с целью получения наилучшего отношения сигнал / шум и минимальных искажений при записи зависимости второй производной зондового тока на самописце.

Для согласования частоты усилителя и ГНЧ их соединяют кабелем и добиваются максимума сигнала на выходе усилителя при вращении ручки "частота грубо" усилителя.

Затем, восстановив схему, наблюдая на экране осциллографа сигнал с выхода ГВЧ, устанавливают амплитуду ВЧ и НЧ сигналов регуляторами выхода ГНЧ и ГВЧ и ручкой "уровень к" ГВЧ таким образом, чтобы амплитуда сигнала соответствовала указанной в руководстве, а форма - 100%-но модулированному синусоидальному гармоническому сигналу (рис. 5).

После того, подключив усилитель к выходу измерительного блока ИВ, а осциллограф и синхронный детектор - к выходу усилителя, корректируют рабочую частоту усилителя ручкой "частота плавно" и настраивают фазу синхронного детектора ручкой "фаза", добиваясь максимума сигнала на выходе синхронного детектора.

На этом настройку схемы по переменному току можно считать законченной.

5. Измерение функций распределения электронов

Подключив самописец к выходу синхронного детектора, установив соответствующее значение чувствительности входа "У", можно включать самописец и записывать графики. Так же, как и при записи вольтамперных характеристик следует записать функции распределения электронов у различных зондов при фиксированном разрядном токе. При включении развертки следите за током на зонде, выполняйте правила, указанные в начале настоящего параграфа.

6. Обработка полученных результатов

1. Нанести на полученные вольтамперные характеристики зондов оцифровку осей координат, как указано в приложении "Планшетный двухкоординатный самописец". Построить вольтамперные характеристики в полупологарифмическом масштабе, определить из электронных ветвей этих характеристик значения электронной температуры и концентрации электронов для каждого зонда. Определить значения потенциала пространства вблизи зондов и оценить величины напряженности электрического поля в положительном столбе разряда и в прикатодной области.

2. По полученным графикам второй производной зондового тока построить функции распределения

электронов по энергиям в плазме (в относительной мере). По положению максимума функции распределения определить значения электронной температуры вблизи всех изученных зондов. Сравнить со значениями, полученными предыдущим методом.

3. Используя значения T_e полученные по функциям распределения электронов, построить максвелловские функции распределения в максимумах совпадающие с измеренными. Сравнить построенные "синтетические графики" с полученными из эксперимента. Сделать вывод о составе электронного газа (если это возможно).

Требования к отчету

Отчет должен содержать:

1. Все записанные в эксперименте и построенные по экспериментальным данным графики.
2. Таблицу следующих величин для трех зондов:
 - а. Потенциал изолированного зонда
 - б. Потенциал пространства
 - в. электронную температуру (два значения)
 - г. концентрацию электронов
3. Оценку напряженности электрического поля в положительном столбе и в прикатодной области.
4. Вывод о составе электронов в плазме.

Приложение 1

Вывод формула Дрювестейна для сферического зонда

Формула Дрювестейна связывает функцию распределения электронов по энергиям в плазме и зависимость второй производной электронного тока на зонд по потенциалу зонда от потенциала зонда. Формула справедлива для зондов произвольной выпуклой формы. Ее вывод для случая зонда произвольной формы довольно сложен, поэтому здесь рассматривается только сферический зонд.

Вообще говоря, функция распределения электронов по энергиям в плазме зависит от энергии электрона ε , координат, времени и проекций скорости электрона на оси координат. Если же плазма однородна, стационарна и изотропна, то единственным ее аргументом будет кинетическая энергия частиц:

$$\varepsilon = \frac{mV^2}{2} \quad (23)$$

Здесь m - масса электрона, ε - его скорость. Как известно из курса общей физики, функция распределения частиц по энергиям $F(\varepsilon)$ может быть нормирована на единицу либо на концентрацию частиц в данной точке n_0 . Воспользуемся вторым способом:

$$\int_0^{\infty} F(\varepsilon)d\varepsilon = n_e \quad (24)$$

Тогда $F(\varepsilon)$ будет иметь следующий смысл: концентрация электронов с энергиями от ε до $\varepsilon + d\varepsilon$:

$$n_{\varepsilon, \varepsilon+d\varepsilon} = F(\varepsilon)d\varepsilon \quad (25)$$

Предположим, что давление газа настолько мало, что область вблизи зонда (т.е. область, где потенциал заметно отличается от потенциала невозмущенной зондом плазмы) электроны пролетают без столкновений. Тогда для сферического зонда можно воспользоваться решением задачи о движении частиц в отталкивающем центральном поле из курса теоретической механики. Частица приблизится к центру зонда ближе чем не радиус зонда (иными словами упадет на зонд) в том случае, если ее прицельный параметр P , будет меньше своего "критического" значения P_0

$$P < P_0 \quad P_0 = r_3 \left(1 + \frac{eU}{\varepsilon}\right) \quad (26)$$

где r_3 - радиус зонда, U - потенциал зонда относительно плазмы.

Траектории движения электронов вблизи зонда при отталкивающем электроны потенциале зонда изображена на рис.12. Для вывода формулы на время представим себе другой зонд, имеющий радиус P_0 и находящийся под потенциалом пространства. Очевидно, такой зонд не будет искажать прямолинейных траекторий электронов (рис.12); потоки электронов летящих по какому либо заранее выбранному направлению, на эти два зонда будут равны, так как в обоих случаях равны потоку через круг радиусом P_0 . Значит, и потоки электронов со всех направлений на эти

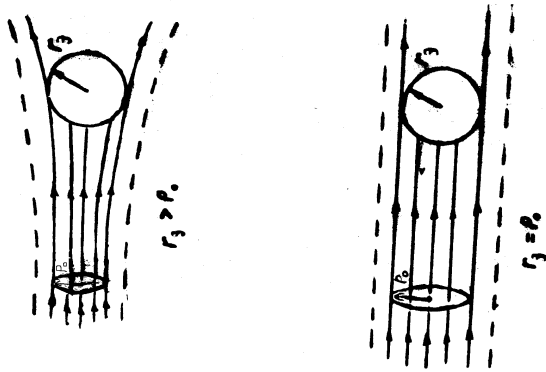


Рис. 12.

два зонда будут равны, будут равны и электронные токи на эти зонды. Поэтому для вывода выражения электронного тока на зонд (а) достаточно рассмотреть ток на зонд (б).

Воспользуемся известным выражением для плотности электронного хаотического тока

$$j_{\varepsilon, \varepsilon + d\varepsilon} = n_{\varepsilon, \varepsilon + d\varepsilon} eV \quad (27)$$

и выражением для площади поверхности зонда (б):

$$S^{(6)} = 4\pi P_0^2 \quad (28)$$

а также формулами (25) и (26). Тогда получим следующее выражение для тока, переносимого электронами с энергиями от ε до $\varepsilon + d\varepsilon$:

$$i_{\varepsilon, \varepsilon + d\varepsilon}^{(6)} = j_{\varepsilon, \varepsilon + d\varepsilon}^{(6)} S^{(6)} = 4\pi r_3^2 \frac{e}{2\sqrt{2m}} \frac{\varepsilon - eU}{\sqrt{\varepsilon}} F(\varepsilon) d\varepsilon \quad (29)$$

Учитывая равенство электронных токов на зонды

$$i_{\varepsilon, \varepsilon+d\varepsilon}^{(a)} = i_{\varepsilon, \varepsilon+d\varepsilon}^{(b)} \quad (30)$$

и выражение для площади поверхности первого зонда

$$S^{(a)} = 4\pi r_3^2 \quad (31)$$

для плотности тока, переносимого упомянутыми электронами, можно получить:

$$j_{\varepsilon, \varepsilon+d\varepsilon}^{(a)} = \frac{e}{2\sqrt{2m}} \frac{\varepsilon - eU}{\sqrt{\varepsilon}} F(\varepsilon) d\varepsilon \quad (32)$$

После интегрирования выражения (32) по энергиям электрона от eU до ∞ (так как электроны с энергиями $\varepsilon < eU$ до зонда не долетают), получаем для плотности электронного тока на зонд следующее выражение:

$$j_e = \frac{e}{2\sqrt{2m}} \int_{eU}^{\infty} \frac{\varepsilon - eU}{\sqrt{\varepsilon}} F(\varepsilon) d\varepsilon \quad (33)$$

Следует заметить, что при выводе этой формулы были учтены только электроны, попадающие из плазмы на поверхность зонда, и не были учтены электроны, попадающие с поверхности электрона в плазму либо в результате отражения падающих на зонд электронов, либо в результате эмиссии электронов зондом. Понятно, что формула (24) (совпадающая с формулой (2) из §3 настоящего описания) получена в предположении малости вклада этих процессов в полный электронный ток на зонд. Чтобы получить из (24) формулу Дрювестейна (см. ф-лу (15) из §4) достаточно продифференцировать это выражение по U два раза.

Приложение 2

Описание планшетного двухкоординатного самописца

Планшетный двухкоординатный самописец типа ПДС представляет собой точный измерительный прибор, графически изображающий функциональную зависимость между двумя сигналами (напряжениями), поступающими на его два конца.

Поясним кратко принцип действия прибора. Перо самописца имеет две степени свободы и перемещается по плоскости планшета самописца при помощи двух электродвигателей: один перемещается вдоль оси X, другой вдоль оси Y. Усилие от двигателей передается к перу верньерным устройством, напоминающим устройство для перемещения указателя частоты настройки радиоприемника (при вращении его ручки настройки). Перо связано механически с движками двух реохордов (оси X и оси Y). Назначение реохордов - контролировать положение пера на плоскости. Если положение пера по какой-либо координате в данный момент времени не соответствует входному сигналу данной координаты, то на соответствующий двигатель подается сигнал ошибки, пропорциональный (грубо говоря) величине рассогласования. Этот сигнал заставляет двигатель перемещать перо так, чтобы ликвидировать это рассогласование.

Таким образом, непрерывно "прослеживая" входной

сигнал, перо вычерчивает линию, координата X каждой точки которой пропорциональна сигналу X на входе самописца, а координата Y - сигналу на входе Y .

Самописец снабжен следующими регулировками:

- начального положения пера (при нулевых сигналах на входах);
- ступенчатой и плавной регулировкой чувствительности входов;
- кнопками "контроль нуля", закорачивающими соответствующий вход;
- кнопками включения плавной регулировки чувствительности каналов ("плавно");
- кнопкой "сеть";
- кнопкой "Двиг", включающий двигатель пера;
- кнопкой "Диагр", включает генератор электростатического заряда, удерживающего лист бумаги на планшете (кстати, не трогайте планшет при включенной генераторе заряда);
- кнопкой "Перо", включающей электромагнит, опускающей перо на бумагу.

Выполняя настоящую лабораторную работу, не следует пользоваться кнопкой "Контроль нуля" так как закорачивание выхода измерительного блока может привести к очень нежелательным последствиям для зонда, и кнопкой "Плавно", так как при нажатии этой кнопки становится неопределенной чувствительность самописца, что создает трудности при обработке результатов работы.

Лист миллиметровки на планшет устанавливает

лаборант.

Порядок работы с самописцем следующий:

1. Убедившись в том, что на входы самописца не поступают сигналы (зонд и генератор развертки отключены от схемы соответствующими тумблерами), включить самописец кнопкой "сеть".

2. После 10-20 с прогрева включить двигатель кнопкой "Двиг" и установить перо приблизительно в центр планшета ручками "Уст.Нуля".

3. Установив на генераторе развертки нужную амплитуду и скорость развертки, подключить генератор развертки к схеме (тумблером). Убедившись в нормальной развертке на самописце (каретка не достигает края планшета, не мечется по планшету как угорелая).

4. После этого можно подавать сигнал на вход $У$ (установив соответствующую чувствительность канала $У$)

5. Отрегулировав чувствительность по оси $У$ окончательно, можно нажать кнопку "Перо" записать нужные результаты.

Для удобства обработки регистрограммы на лист можно записать прямые, соответствующие нулевым сигналам ("оси координат"). Тогда положение оси $У$ по горизонтали будет соответствовать направлению зондового смещения $U_{з\text{раб}}$, а положение оси X по вертикали - нулю тока зонда либо нулю второй производной зондового тока. Масштаб то осям определяется положениями переключателей чувствительности самописца и значением сопротивления R_3 .

Не оставляйте надолго включенным самописец. Тем более не оставляйте его без присмотра во время записи диаграммы. По окончании работы с самописцем выключите его. Кнопка "Сеть" выключается последней.