

УДК 533.9.082.7

О достоверности зондовой диагностики ВЧ-плазмы

В. А. Рябый, В. А. Обухов

Показано, что погрешности зондовой диагностики покоящейся или медленно движущейся плазмы Q-машин или разряда постоянного тока обычно лежат в диапазоне $\pm (20\text{—}30)\%$. Рассмотрены проблемы зондовых измерений в высокочастотной (ВЧ) плазме и современные способы их разрешения. Объективность зондовой диагностики ВЧ-плазмы установлена по взаимному согласованию функций распределения электронов по энергиям, измеренных в одном эксперименте зондами Ленгмюра и оптическим методом относительных интенсивностей спектральных линий.

PACS: 52.70.Ds/Kz

Ключевые слова: плазма газового разряда постоянного тока, Q-машина, ВЧ-разряд, зонд Ленгмюра, вольт-амперная характеристика.

Введение

Измерения параметров плазмы, дающие знание функции распределения электронов по энергиям и их концентрации n_e и температуры T_e , играют важную роль в экспериментальной физике, потому что позволяют судить о правильности понимания физики изучаемого источника плазмы, грамотности и эффективности разработанной конструкции устройства и его систем. Важное значение имеет также локальная диагностика плазмы, дающая детальную картину процессов ионизации рабочего вещества в изучаемом источнике плазмы.

Наиболее простым инструментом локальной диагностики плазмы является зонд Ленгмюра в виде небольшого отрезка тонкой проволоочки, введенной в интересующее место генератора плазмы. Это цилиндрический зонд, вольт-амперная характеристика которого относительно опорного электрода (электрода газового разряда или металлической поверхности в контакте с плазмой) дает сведения о температуре T_e и концентрации n_e электронов, а также о потенциале плазмы относительно того же электрода. Указанную информацию получают в результате обработки зондовой характеристики на основании зондовой теории. Простейший ее вариант применительно к тлеющему разряду постоянного тока предложил в 1924 г. И. Ленгмюр [1], чьим именем и был назван этот

электростатический зонд (спустя 4 года Ленгмюром было также предложено и само слово "плазма" [2], обозначившее квазинейтральную ионизованную среду). Теория Ленгмюра предполагает максвелловское распределение электронов по энергиям, которое весьма вероятно для неизотермической плазмы тлеющего разряда постоянного тока при давлении ниже 10 Па. Данная функция распределения электронов по энергиям еще более вероятна для бестоковой, изотермической, неподвижной или медленно движущейся поверхностно ионизованной плазмы Q-машин [3], применявшихся, в частности, для изучения волнообразования или диффузионных процессов в плазме применительно к термоядерным исследованиям.

В этих условиях, отвечающих условиям применимости теории Ленгмюра, представлялось весьма интересным выяснить степень достоверности результатов зондовых измерений. Для этого исследователи проводили измерения одних и тех же параметров плазмы разными методами в одном эксперименте. Так, в работе [3] сравнивались величины концентрации электронов, полученные зондом Ленгмюра и СВЧ-методом. В этом эксперименте зондовые измерения затруднялись внешним магнитным полем до 1500 Гс, поэтому обработке, по-видимому, подвергались только ионные ветви зондовых характеристик, причем СВЧ-измерения велись на длине волны $\lambda = 8$ мм. В целом констатировалось хорошее согласие полученных результатов. В работе [4] также в условиях покоящейся плазмы Q-машины результаты зондовых измерений сопоставлялись с данными двух других диагностических методик: по сдвигу резонансной частоты объемного СВЧ-резонатора с плазменным столбом на его оси, введенным через запердельные окна резонатора и по резонансному излучению спектральных линий бария. Оказалось,

Рябый Валентин Анатольевич, старший научный сотрудник.

Обухов Владимир Алексеевич, зам. директора.
НИИ прикладной механики и электродинамики
Московского авиационного института.
Россия, 125080, Москва, Ленинградское ш., 5.
Тел. (499) 158-00-20. E-mail: riame@sokol.ru

Статья поступила в редакцию 25 марта 2012 г.

© Рябый В. А., Обухов В. А., 2012

что результаты зондовых измерений концентрации электронов превысили данные обеих упомянутых методик в 2,5 раза. Такого итога можно было ожидать, поскольку зонд работал в магнитном поле порядка 10^3 Гс. Поэтому опять использовалась ионная ветвь его вольт-амперной характеристики при обработке упрощенным методом Ленгмюра.

Подобная практика зондовой диагностики в разрядах постоянного тока при отсутствии внешнего магнитного поля (что позволяло использование электронной ветви зондовых характеристик, которая намного точнее характеризует параметры плазмы) привела к общепринятому мнению о масштабе погрешности зондовых измерений функции распределения электронов плазмы по энергиям около $\pm 20\%$ [5] и к несколько более широкому полю погрешности порядка $\pm 30\%$ для n_e и T_e .

При переходе к плазме ВЧ-разрядов, имеющих большое значение в экспериментальной физике и технике, возникают сложности, связанные с ВЧ-наводками на зондовую цепь и выпрямлением ВЧ-напряжения на нелинейной проводимости призондового слоя объемного заряда. В результате появляются сильные возмущения зондовой характеристики, в частности, она смещается в отрицательном направлении потенциала зонда, что приводит к значительным погрешностям в оценках всех параметров плазмы [6].

Методы борьбы с указанными трудностями зондовой диагностики непрерывно развивались и совершенствовались в течение последних четырех десятилетий. В настоящее время в этой области экспериментальной физики достигнуты заметные успехи, которые желательно оценить путем сопоставления результатов зондовых измерений параметров ВЧ-плазмы с данными независимых методик диагностики, чтобы установить степень достоверности зондовой информации о ВЧ-плазме. Данная работа представляет аналитический обзор путей решения этого вопроса с акцентом на индукционном ВЧ-разряде, который привлекает особое внимание применительно к плазмохимической технологии микроэлектроники и к ионным ВЧ-двигателям, представляющим реальную перспективу в качестве электроракетного двигателя космических аппаратов.

Корректность организации зондовой диагностики плазмы

Метод Дрювестейна

В диагностике газоразрядной плазмы контактным методом зондов Ленгмюра, которые широко применяются для локальной диагностики плазмы любых видов, особое значение имеют измерения $f_p(\varepsilon)$ — функции распределения электронов по

энергиям ε (ФРЭЭ) или производной от нее вероятности распределения электронов по энергиям $f_p(\varepsilon) = \varepsilon^{-1/2}F(\varepsilon)$ (ВРЭЭ). Многолетняя и обширная практика зондовой диагностики ВЧ-плазмы привела специалистов, недавно опубликовавших обзор [7], к выводу о том, что внешний вид измеренных ФРЭЭ весьма чувствителен к ВЧ-наводкам на зондовую цепь, ее электрическому сопротивлению, к размерам зонда и ближайшего к нему зондодержателя, а также к чистоте собирающей поверхности зонда и дрейфу параметров плазмы. Эти особенности зондовой диагностики ВЧ-плазмы тесно связаны с эффектом выпрямления переменного напряжения на нелинейной проводимости призондового слоя объемного заряда. Неудачные технические решения по устранению паразитного влияния перечисленных особенностей искажают форму ФРЭЭ, чаще всего занижая ее значения и смещая максимум от нулевой энергии электронов в точку потенциала пространства. Этот искусственный, ложный эффект, уменьшающий n_e и завышающий T_e , назван в [7] "дрювестейнизацией".

В связи с внешним видом ФРЭЭ следует отметить такой факт: подавляющее количество электронов плазмы имеют относительно невысокую энергию в диапазоне $0 \leq \varepsilon \leq T_e$ (здесь энергия и температура электронов выражены в вольт-овом эквиваленте, т. е. температура в кельвинах умножена на отношение постоянной Больцмана $k = 1,38 \cdot 10^{-23}$ Дж/К к элементарному заряду $e = 1,6 \cdot 10^{-19}$ Кл). Имея в виду эту физическую особенность, авторы [7] сформулировали следующее требование к технике регистрации ФРЭЭ: для корректного определения параметров плазмы интервал ΔV_p между точкой $\varepsilon = 0$ и потенциалом V , соответствующим максимуму второй производной зондового тока $I_p''(V)$, пропорциональной ВРЭЭ, должен отвечать условию

$$\Delta V_p < T_e. \quad (1)$$

При выполнении этого неравенства и экспоненциальной экстраполяции измеренной ВРЭЭ к $\varepsilon = 0$ ее интегрирование для получения температуры и концентрации электронов даст минимально искаженный результат. Без такой экстраполяции интегрирование приведет к занижению n_e и некоторому завышению T_e , так как электроны малой энергии вблизи $\varepsilon = 0$ составляют большую часть их общего количества.

Отметим, что недостаточное внимание исследователей к указанным особенностям зондовой диагностики, приводящее к заметным ошибкам в определении параметров плазмы, может не только дезориентировать их в уровнях параметров плазмы, но и привести к ошибочным выводам относительно обнаружения якобы "новых" физических

явлений. Примерно в такой ситуации оказались авторы работ [8, 9], в первой из которых приведены результаты зондовых измерений ФРЭЭ в плотной геликоновой плазме, а во второй выполнено расчетное обобщение полученных данных с выводом о том, что в условиях этого эксперимента измеренные ФРЭЭ лучше всего описываются функцией Дрювестейна. На самом деле, построение зондовой цепи и организация измерений в [8] содержали некорректности, которые и привели авторов [9] к ошибочным выводам о форме ФРЭЭ и сути явлений в исследовавшемся реакторе на основе геликонового ВЧ-разряда.

Особое внимание проблемам зондовых измерений ФРЭЭ авторы [7] уделили в работе [10]. Здесь были рассмотрены отмеченные выше трудности, включая необходимость связывать результаты измерений локальных параметров плазмы не с той мощностью, которую ВЧ-генератор передает во внешнюю цепь, а с мощностью разряда, поглощаемой электронами, поскольку именно эта величина определяет процессы и параметры газоразрядной плазмы. К ним не имеют отношения потери ВЧ-мощности в согласующем устройстве, соединительных кабелях и в окружающих электропроводящих деталях, в которых возбуждаются вихревые токи.

Некоторые частные вопросы построения зондовой цепи рассматривались в [10] как теоретически, так и экспериментально. Расчет изучалось влияние на вторую производную зондового тока $I_p''(V_p)$ отношения $\delta = R_C/R_{p0}$ электрического сопротивления зондовой цепи R_C к минимальному дифференциальному сопротивлению зондовой характеристики $R_{p0} = kT_e/(eI_0)$ (здесь I_0 — ток зонда при потенциале пространства) для частного случая максвелловской ФРЭЭ. Результаты этого расчета приведены на рис. 1. Видно, что при малом сопротивлении зондовой цепи ($\delta \rightarrow 0$) вторая производная зондового тока предстает в виде прямой линии (в полулогарифмическом масштабе), тогда как при $\delta \neq 0$ искажения появляются и усиливаются с относительным ростом R_C . По данным [10], при потенциале плазмы искусственное занижение I_p'' не превысит 3 %, если отношение $\delta = R_C/R_{p0} \leq 0,01$.

Экспериментальное исследование проблемы искажений ФРЭЭ, вызванных ВЧ-наводками на призондовом слое объемного заряда, было выполнено в [10] на примере емкостного ВЧ-разряда в гелии при давлении 10^{-1} Торр на частоте 13,56 МГц. Результат этого эксперимента в виде измеренных функций $I_p''(V_p)$ при разных степенях фильтрации ВЧ-наводок в зондовой цепи представлен на рис. 2. Здесь кривая 1 с высокой, острой вершиной получена при полной защите зондовой цепи набо-

ром резонансных фильтров-пробок, причем ее обращение в нуль соответствует потенциалу пространства $V_p = 0$, а кривая 2 с пониженной и смещенной вершиной получена при отключенном фильтре второй гармоники ВЧ-напряжения (на частоте $f \approx 27$ МГц). Видно, что частичное ослабление фильтрования ВЧ-наводок сместило верхний максимум кривой 2 от нулевой точки $V_p = 0$ на величину $\Delta V_p \sim T_e = 4 \text{ В} \approx T_e \cdot \ln[I_0(V_{rf}/T_e)]$ в нарушение неравенства (1) (здесь I_0 — модифицированная функция Бесселя, а V_{rf} — ВЧ-напряжение на призондовом слое объемного заряда). Полученный методический результат количественно демонстрирует необходимость аккуратного фильтрования ВЧ-наводок в зондовой цепи.

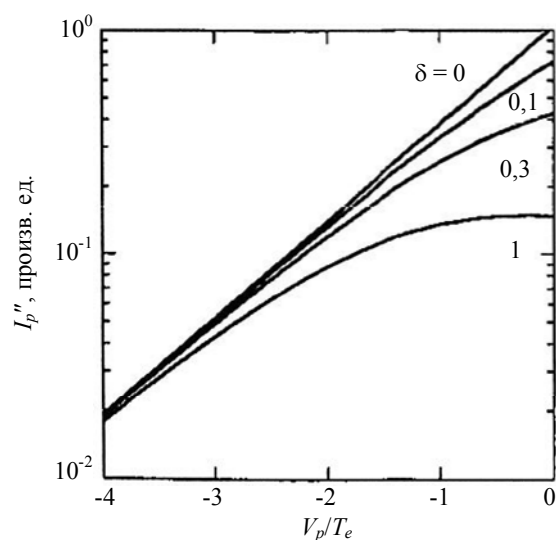


Рис. 1. Влияние электрического сопротивления зондовой цепи на вид функции $I_p''(V_p/T_e)$

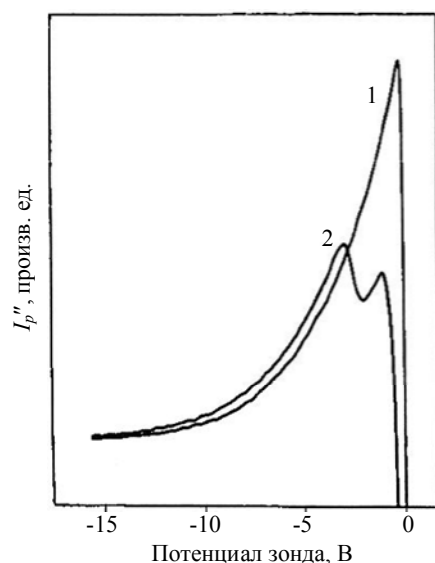


Рис. 2. Вторые производные зондового тока при различных вариантах фильтрации ВЧ-наводок в зондовой цепи: 1 — полное фильтрование; 2 — частичное фильтрование

Некоторые особенности влияния суммарной совокупности многих факторов построения зондовых цепей показывает сравнение функций ВРЭЭ, измеренных двумя зондовыми станциями в одной и той же промышленной индукционной ВЧ-установке в плазме аргона при давлении 0,02 Торр: зондовой станцией Hiden ESPION компании Hiden Analytical Ltd. [11], в которой зондодержатель выполнен в виде керамического стержня диаметром 8 мм, зондовые характеристики обрабатываются методом Дрювестейна, в зондовой цепи предусмотрен набор ВЧ-фильтров, ВЧ- и НЧ-шумы плазменного потенциала подавляются методом Годяка (применением опорного зонда в гальваническом контакте с плазмой), применены автоматизированная очистка и воздушное охлаждение зонда; зондовой системой Plasma Sensors VGPS [12] разработки авторов [7], в которой реализованы все упомянутые выше особенности диагностической системы. В отличие от ESPION, в VGPS зондодержатель выполнен телескопическим с первыми секциями в виде кварцевых капилляров диаметрами 0,17 и 0,35 мм, а также использованы ноу-хау фирмы: очистка зонда программируемым нагревом зонда электронным током до $T \sim 1500$ К и подачей ВЧ-смещения на зонд для его очистки ионной бомбардировкой, а также широкополосный набор миниатюрных ВЧ-фильтров.

Результаты измерений обеими зондовыми станциями представлены на рис. 3. Здесь нижние кривые в каждой серии измерений соответствуют мощности разряда 250 Вт, верхние — 2000 Вт, пунктирные линии обозначают предельные границы кондиционных измеренных ВРЭЭ, а стрелка на рис. 3, б указывает направление возрастания частоты электрон-электронных столкновений, т. е. усиление максвеллизации плазмы. Видно, что по сравнению с данными VGPS вершины ВРЭЭ, зафиксированные ESPION, занижены не менее чем в 2 раза, а их "хвосты" срезаны, что ограничило вертикальный размах ВРЭЭ одним-двумя порядками величины. Последующая обработка таких деформированных функций ВРЭЭ привела к искусственному занижению концентрации электронов и завышению их температуры, т. е. к упомянутой "дрювестейнизации" ВРЭЭ. Ограничение вертикального размаха этих функций в результатах ESPION сократило также охваченный диапазон энергии электронов, при котором информация о неупругих процессах с энергией выше $\varepsilon^* = 11,55$ эВ (порога возбуждения аргона) оказалась утраченной.

Станция VGPS обеспечила вертикальный размах ВРЭЭ масштаба 3—4,5 порядков величины. В упругой области энергий ($\varepsilon \leq 11,55$ эВ) эти функции оказались близки к максвелловскому распределению электронов по энергии, что отве-

чает основополагающей концепции физики плазмы: при увеличении ВЧ-мощности и концентрации электронов n_e их эффективное взаимодействие посредством электрон-электронных столкновений с частотой $\nu_{ee} \sim n_e T_e^{-3/2}$ должно приводить к "максвеллизации" электронной компоненты плазмы. Следовательно, данные станции ESPION (и многих других коммерчески доступных систем), искажающие форму ВРЭЭ так, что она все более отходит от максвелловской при возрастании мощности разряда, противоречат указанной концепции. В результате приборы типа ESPION могут приводить к получению физически неверных результатов в области малых энергий электронов и оказываются бесполезны в области неупругих взаимодействий электронов с атомами рабочего газа.

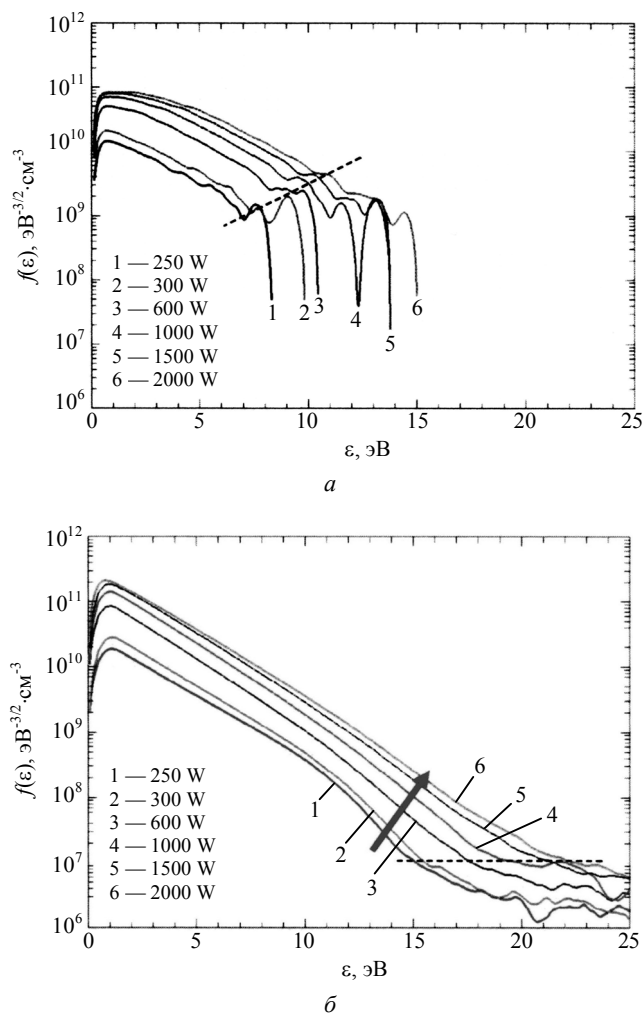


Рис. 3. Сравнение ВРЭЭ, измеренных зондовыми системами ESPION (а) и VGPS (б)

Анализируя причины выявленных расхождений, можно отметить несколько моментов. Во-первых, крупный зондодержатель ESPION диаметром 8 мм может заметно снизить измеряемую концентрацию электронов за счет их отбора из

зоны измерений путем амбиполярной диффузии заряженных частиц к зондодержателю. В станции VGPS с более тонким зондодержателем этот эффект значительно ослаблен. Во-вторых, в станции ESPION зонд очищается только ионной бомбардировкой, тогда как в станции VGPS, кроме ионной бомбардировки, поверхность зонда очищается программируемым током электронов. В-третьих, превышение электрическим сопротивлением зондовой цепи минимального дифференциального сопротивления зондовой характеристики $R_{p0} = kT_e/(eI_0)$ скомпенсировано в станции VGPS автоматически, тогда как в системе ESPION такая компенсация отсутствует.

Метод ВЧ-модуляции зондовых потенциалов, дополненный численным решением уравнения для зондового тока

С точки зрения анализа внешнего вида ФРЭЭ, представляет интерес сравнение с результатами независимых зондовых измерений [13] методом ВЧ-модуляции зондового напряжения. Этот метод применялся для изучения ФРЭЭ в области упругих взаимодействий электронов, т. е. при энергиях электронов не выше энергетического порога возбуждения газа. В области неупругих взаимодействий электрон—атом ФРЭЭ находились решением некорректно поставленной задачи в виде уравнения для зондового тока, представляющего собой интегральное уравнение Вольтерра 1-го рода. В измерительной системе были предусмотрены ВЧ-фильтры на основной частоте и ее первой гармонике, очистка поверхности зонда осуществлялась длительной ионной бомбардировкой при постоянном отрицательном потенциале зонда. Объектом исследования был емкостный ВЧ-разряд в ксеноне на частоте $f = 40,6$ МГц при давлении 10^{-2} — 10^0 Торр. Изучался α -разряд, в котором ионизация рабочего газа осуществляется электронным ударом только в положительном столбе разряда. Этот режим горения разряда устанавливался при напряжении $U \leq 70$ В. Полученная в [13] ФРЭЭ для давления $2 \cdot 10^{-2}$ Торр, перестроенная в ВРЭЭ для концентрации электронов $n_e = 3 \cdot 10^{10}$ см $^{-3}$, представлена на рис. 4. Видно, что ее форма, особенно в области упругих взаимодействий электрон—атом, вполне соответствует представлениям авторов [7] о качественном построении зондовой цепи и процедуры регистрации зондовых характеристик. Видимо, данный метод локальной диагностики плазмы, достаточно полно учитывающий роль электронов малых энергий, оказался свободен от ряда проблем, характерных для рассмотренного выше метода Дривестейна.

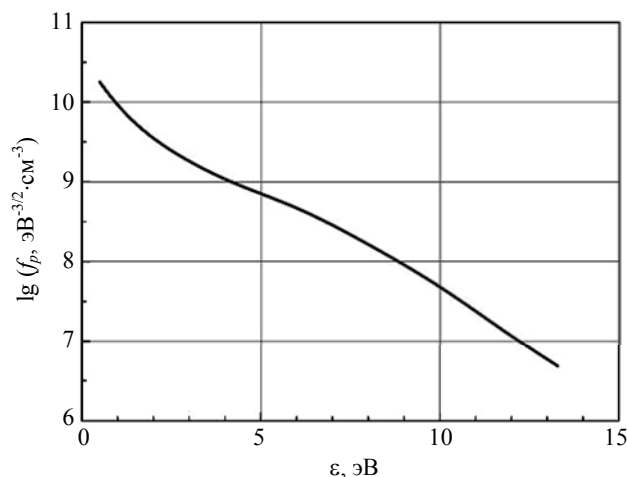


Рис. 4. ВРЭЭ для ксенона [8]: емкостный ВЧ-разряд, давление $2 \cdot 10^{-2}$ Торр

Объективность результатов зондовых измерений

Приведенные факты свидетельствуют о том, что в современной экспериментальной физике имеются надежные методические наработки, обеспечивающие корректность техники регистрации и расшифровки зондовых характеристик. Однако для доказательства объективности результатов таких измерений необходимо сопоставить их с данными других, физически независимых методов диагностики, примененных в одинаковых экспериментальных условиях. Очевидно, что наилучшим образом эта задача может быть решена в одном эксперименте, как это делалось в покоящейся плазме Q-машин [3, 4].

Именно последний из экспериментов, касающихся сравнения ФРЭЭ, одновременно измеренных зондами Ленгмюра и оптическим методом относительных интенсивностей плазменных спектральных линий, осуществили две различные группы исследователей [14, 15]. Работа [14] была проведена в пекинском университете Цинхуа, КНР, с участием рурского университета в г. Бохум, а другая [15] — в лаборатории физики плазмы в Принстоне, США, с участием университета г. Хьюстон.

В работе [14] изучалась плазма емкостного и индукционного ВЧ-разрядов в смеси аргон—криптон при давлении 10^{-2} — 10^0 Торр и соотношении расходов газов 2:1. Типичные результаты этого эксперимента представлены на рис. 5. Видно, что результаты сравниваемых методик удовлетворительно согласовались между собой, хотя здесь зондовая система не была столь продвинутой, как в случае VGPS.

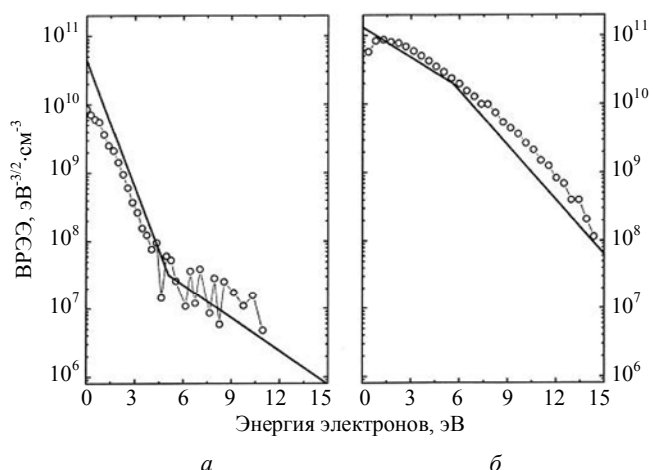


Рис. 5. Сравнение данных по ВРЭЭ, полученных спектральным и зондовым методами.

Частота $f = 13,56$ МГц, сплошные линии — спектральные измерения, кружки — зонд Ленгмюра; а — емкостный ВЧ-разряд, давление $P = 0,075$ Торр, мощность $N = 100$ Вт; б — индуктивный ВЧ-разряд, $P = 0,037$ Торр, $N = 66$ Вт

В работе [15] изучалась плазма пеннинговского разряда (тлеющего разряда постоянного тока во внешнем магнитном поле) с индукционным ВЧ-катодом конструкции В. А. Годяка и его сотрудников [16]. Рабочим газом служил ксенон при давлении $\sim 3 \cdot 10^{-4}$ Торр с добавкой смеси инертных газов, которые обеспечивали приемлемую точность измерений методом относительных интенсивностей спектральных линий. Типичные результаты [15] для двух радиальных позиций $R = 3$ и 5 см представлены на рис. 6.

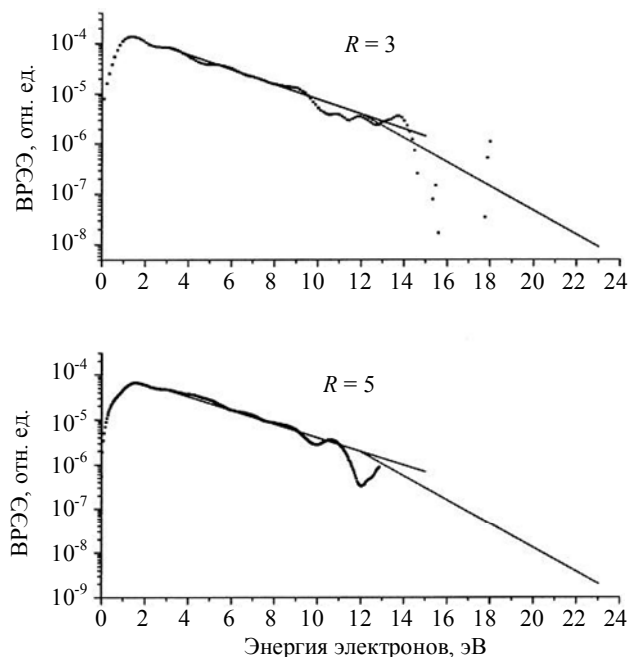


Рис. 6. ВРЭЭ, измеренные в [15] двумя диагностическими методами на радиальных расстояниях от оси 3 и 5 см. Прямые линии — спектральные данные; извилистые кривые — зонд Ленгмюра; мощность катодного ВЧ-разряда — 50 Вт, основного разряда Пеннинга — 30—250 Вт

Здесь согласие полученных данных оказалось значительно лучше. По-видимому, причиной лучшего совпадения этих результатов послужило повышение точности зондовых измерений, достигнутое применением зондовой станции VGPS (модель 2010 г.).

На основании проведенного сопоставительного анализа можно полагать, что согласование измеренных ФРЭЭ, полученных в двух независимых экспериментах двумя различными диагностическими методами, не является случайным. Следовательно, в этих опытах удалось найти истинные локальные параметры исследуемой газоразрядной плазмы.

Заключение

Установлено, что в настоящее время усилиями многих исследователей методика зондовой диагностики плазмы вообще и ВЧ-плазмы, в частности, достигла высокой степени совершенства.

Сравнение измеренных ФРЭЭ, полученных физически различными методами, показало их согласие и, следовательно, объективность, что имеет важное значение для успешного развития физики и техники ВЧ-плазмы.

Компактную и быструю зондовую станцию VGPS [7], использующую самые передовые в настоящее время достижения экспериментальной физики, можно рекомендовать как наиболее продвинутую систему зондовой диагностики плазмы любых видов.

Работа выполнена в рамках гранта
Правительства РФ от 25 ноября 2010 г.
№ 11.G34.31.0022 по государственной поддержке
научных исследований, проводимых
под руководством ведущих зарубежных ученых.

Литература

1. Langmuir I., Mott-Smith H. // General Electric Review. 1924. V. 27. P. 449.
2. Langmuir I. // Proceedings of the National Academy of Sciences of the USA (Proc. Natl Acad. Sci. USA). 1928. V. 14. P. 627.
3. Rynn N., D'Angelo N. // Rev. Sci. Instr. 1960. V. 31. No. 12. P. 1326.
4. Hashmi M., van der Houven van Oopdt A. J., Wegrowe J. G. // Nuclear Fusion. 1968. V. 8. P. 197.
5. Тимофеев Н. А. Зондовые методы исследования плазмы. Методическое пособие. — СПбГУ: Изд. СПбГУ, 2002.
6. Годяк В. А., Попов О. А. // ЖТФ. 1977. Т. 47. № 4. С. 766.
7. Godyak V. A., Demidov V. I. // J. Phys. D: Appl. Phys. 2011. V. 44. P. 233001.
8. Takahashi K., Charles C., Boswell R. W., Kaneko T., Hatakeyama R. // Phys. Plasmas. 2007. V. 14. P. 114503.
9. Takahashi K., Charles C., Boswell R. W., Fujiwara T. // Phys. Rev. Lett. 2011. V. 107. P. 035002.

10. Godyak V. A., Piejak R. B., Alexandrovich B. M.// Plasma Sources Sci. Technol. 1992. V. 1. P. 36.
11. Hiden ESPION Advanced Langmuir Probe System: <http://www.hidenanalytical.com> (Hiden Analytical Ltd.)
12. VGPS Probe System: <http://www.plasmasensors.com> (Plasma Sensors Co.)
13. Еришов А. П., Кузовников А. А.// Физика плазмы. 1985. Т. 11. №. 5. С. 618.
14. Zhu X. M., Chen W. C., Pu Y. K.// In: Proc. 30th Int. Conf. Phen. Ionized Gases. — Belfast, Northern Ireland, UK, Aug.-Sept 2011, Report No. B6.
15. Raitses E., Baele P., Donnelly V. M.// In: Proc. 64th Gaseous Electronics Conf., Salt Lake City, UT, USA, November 2011.
16. Godyak V. A., Raitses Y., Fisch N. J.// In: Proc. 30th International Electric Propulsion Conference, Florence, Italy, September 2007.

About adequacy of probe diagnostics in RF plasmas

V. A. Riaby, V. A. Obukhov

RIAME MAI

5 Leningrad rd., Moscow, 125080, Russia

E-mail: riame@sokol.ru

Problems of probe diagnostics in radio frequency (RF) gas discharge plasma have been considered focusing on the ways and correctness criteria of their solution. It has been found out that presently the art of this diagnostics method has achieved high degree of reliability and sophistication. Objectivity of its results has been established through comparison of joint measurements of electron energy distribution functions using Langmuir probe and spectral line-ratio methods in the same RF plasma experiments. Mutual agreement of the obtained results had been assumed as an evidence for objectivity of both plasma diagnostics methods.

PACS: 52.70.Ds/Kz

Keywords: gas DC discharge plasma, Q-machine (Q-device), RF discharge, Langmuir probe, Volt-Ampere characteristic, electron energy distribution function.

Bibliography — 16 references.

Received march 25, 2012