

ВОЗМУЩЕНИЕ ИМПЕДАНСА ИНДУКТОРА, ВЗАИМОДЕЙСТВУЮЩЕГО С ПЛАЗМОЙ НИЗКОЙ ПЛОТНОСТИ

Д.В. Рафальский^{***}, С.В. Дудин^{*}, К.И. Положий^{*}

^{*}Харьковский национальный университет имени В. Н. Каразина

Украина

^{**}Научный физико-технологический центр МОН и НАН Украины (Харьков)

Украина

Поступила в редакцию 09.12.2008

В работе описаны экспериментальные исследования импеданса индуктора в цилиндрическом источнике плазмы ВЧ индукционного типа. Представлены результаты измерений напряжения на индукторе, эффективных индуктивности и сопротивления. Сделан вывод, что в случае плазмы низкой плотности мнимой частью импеданса плазмы и геометрической индуктивностью плазмы можно пренебречь. С использованием этого подхода получены простые выражения для эффективного импеданса индуктора, которые хорошо согласуются с экспериментальными результатами.

ВВЕДЕНИЕ

В последние годы ВЧ индукционный (ВЧИ) разряд получил широкое распространение в качестве источника низкотемпературной плазмы для технологических применений. Одним из ключевых элементов любой системы с ВЧИ разрядом является согласующее устройство (СУ). Как правило СУ представляет собой резонансный колебательный П-контур и обеспечивает согласование фиксированного выходного импеданса (50 или 75 Ом) ВЧ генератора (ГВЧ) с комплексным импедансом плазмы. Электрическая схема СУ относительно проста, и при расчете элементов СУ можно использовать элементарные электротехнические законы. Однако, благодаря индуктивной связи, импеданс плазмы является составной частью импеданса индуктора в цепи СУ, который в свою очередь зависит от параметров плазмы. Соответственно, настройка элементов СУ, а также амплитуды ВЧ тока и напряжения индуктора зависят от параметров разряда – давления и сорта рабочего газа, поглощаемой разрядом ВЧ мощности и т.д. Поэтому расчет ВЧ цепи СУ с плазменной нагрузкой представляет собой достаточно сложную задачу. Однако в ВЧИ системах с относительно небольшой плотностью плазмы, как будет показано ниже, можно пренебречь вкладом индуктивности плазмы в индуктивность индуктора, что заметно упрощает расчет.

Целью настоящей работы было экспериментальное и теоретическое исследование

возмущения импеданса индуктора, возбуждающего плазму ВЧИ разряда с невысокой плотностью, при низком давлении рабочего газа. Поскольку данная работа сфокусирована на проблемах разработки эффективного СУ, мы сделали акцент не на собственном импедансе плазмы, а на импедансе индуктора, связанного с плазмой (далее – эффективный импеданс индуктора).

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИЗМЕРЕНИЯ

Принципиальная схема экспериментальной установки показана на рис. 1а. Разрядная камера изготовлена из кварцевой трубки радиусом $R = 19,5$ мм и длиной $L = 79$ мм. Внешний индуктор выполнен в виде 4-х витковой медной спирали с радиусом 30 мм и длиной 34 мм, его собственная индуктивность составляет $L_0 = 0,85$ мкГн. Разрядная камера подсоединена к системе откачки, состоящей из турбомолекулярного (ТН) и форвакуумного насоса (ФН), обеспечивающей остаточное давление не хуже 10^{-6} Торр. В экспериментах использовался ВЧ генератор ГВЧ-1000 с рабочей частотой $\omega/2\pi = 13,56$ МГц и выходным сопротивлением $R_k = 75$ Ом. В качестве рабочего газа использовался аргон. В ходе экспериментов контролировались напряжение на индукторе U_{in} и емкости переменных конденсаторов C_1 и C_2 (рис. 1а). Все измерения производились при фиксированной ВЧ мощности разряда ($P_{rf} = 70$ Вт).

Эффективная индуктивность индуктора $L_s = L_0 - \Delta L$ (где ΔL – возмущение индук-

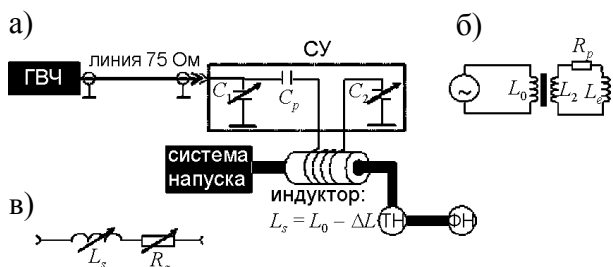


Рис. 1. а) – схема эксперимента; б) – эквивалентная схема ВЧИ разряда в рамках трансформаторной модели; в) – эквивалентная схема индуктора, связанного с плазмой.

тивности индуктора, обусловленное плазменной нагрузкой), согласно приведенной на рис. 1а схеме, может быть определена как:

$$L_s = \frac{C_2 + C_p}{\omega^2 C_2 \cdot C_p} + \frac{C_1 \cdot R_k^2}{1 + (R_k \cdot \omega C_1)^2} - L_x, \quad (1)$$

где L_x – индуктивность подводящих проводников.

Эффективное сопротивление индуктора, обусловленное плазменной нагрузкой и эквивалентное включению последовательно с индуктором резистора R_s (см. рис. 1в) можно определить через подводимую ВЧ мощность:

$$R_s = 2 \cdot \frac{P_{rf}}{I_{in}^2}, \quad (2)$$

где I_{in} – ток, текущий в цепи индуктора:

$$I_{in} = \frac{U_{in}}{\omega L_s}. \quad (3)$$

Здесь мы пренебрегли величиной R_s в виду ее малости по сравнению с ωL_s [3, 4].

Результаты экспериментальных измерений U_{in} и расчётов величин R_s и L_s из экспериментальных значений C_1 , C_2 и U_{in} ($P_{rf} = 70$ Вт) показаны на рис. 3 в сравнении с теоретическими результатами. Как видно из приведенного на рис. 3а графика, в исследуемом диапазоне давлений вклад полной индуктивности плазмы ΔL в индуктивность индуктора не превышает 2%.

ТЕОРИЯ

На рис. 1б, в представлены эквивалентные электрические схемы ВЧИ разряда в рамках трансформаторной модели [2 – 4]. Рассматривается ВЧИ разряд, ограниченный диэлект-

рической цилиндрической камерой длиной L и радиусом R . Индуктор и плазма представлены как две взаимосвязанные индуктивности; данная система рассматривается как трансформатор, в котором первичной N -витковой обмоткой является индуктор, а вторичной – короткозамкнутый виток в плазме, обладающий импедансом Z_{pl} .

Эффективное сопротивление и индуктивность индуктора согласно работам [1 – 5] можно определить как:

$$R_s = \frac{\omega^2 M^2 \cdot R_{pl}}{R_{pl}^2 + (\omega L_e + \omega L_2)^2},$$

$$L_s = L_0 - \Delta L = L_0 - \frac{\omega M^2 (\omega L_e + \omega L_2)}{R_{pl}^2 + (\omega L_e + \omega L_2)^2}, \quad (4)$$

где $L_e = \text{Im}[Z_{pl}]$, $R_2 = \text{Re}[Z_{pl}]$, L_0 – индуктивность индуктора и L_2 – геометрическая индуктивность плазменного витка.

В приведенных выражениях для эффективного импеданса плазмы присутствуют величины, зависящие от параметров плазмы. Для определения этих величин мы использовали следующие предположения:

- 1) плазма однородна;
- 2) область взаимодействия ограничена глубиной проникновения электрического поля в плазму в силу скин-эффекта;
- 3) рассматривается одномерная задача с цилиндрической симметрией (случай “длинного соленоида”)
- 4) Температура электронов и мощность, поглощаемая плазмой определяются в соответствии с пространственно-усредненной моделью ВЧИ разряда [3, 4]. Функция распределения электронов по энергиям полагается максвелловской, температура рабочего газа $T_g = 473$ К.

Для определения импеданса плазмы Z_{pl} в рамках данной модели можно использовать выражение, полученное в работе [3], которое соответствует случаю $\delta \ll R$:

$$Z_{pl} = \frac{4\pi R}{\sigma_{pl} L \delta}. \quad (5)$$

Для расчета проводимости плазмы используется классическое выражение проводимости [1 – 4], в котором частота электрон-атом-

ных соударений и частота электрического поля заменяются на их эффективные значения для учета бесстолкновительных стохастических процессов нагрева плазмы индукционного разряда:

$$\sigma_{pl} = \frac{e_0^2 n_e}{m_e (v_{eff} + i \cdot \omega_{eff})}, \quad (6)$$

где e_0 – заряд электрона, n_e – плотность электронов, m_e – масса электрона, v_{eff} – эффективная частота столкновений, ω_{eff} – эффективная частота генератора.

Эффективная частота столкновений определяется как сумма электрон-атомной v_{en} , электрон-ионной v_{ei} и стохастической частоты столкновений v_{st} . Как показали оценки, частота v_{ei} не вносит существенного вклада в эффективную частоту столкновений при рассматриваемых мощностях, вследствие чего мы пренебрегли ею (см. рис. 2). Частоты v_{en} , v_{st} , ω_{eff} а так же толщина скин-слоя δ определяются согласно методике, описанной в работе [4], с использованием сечения столкновений, полученных с помощью численного кода BOLSIG+.

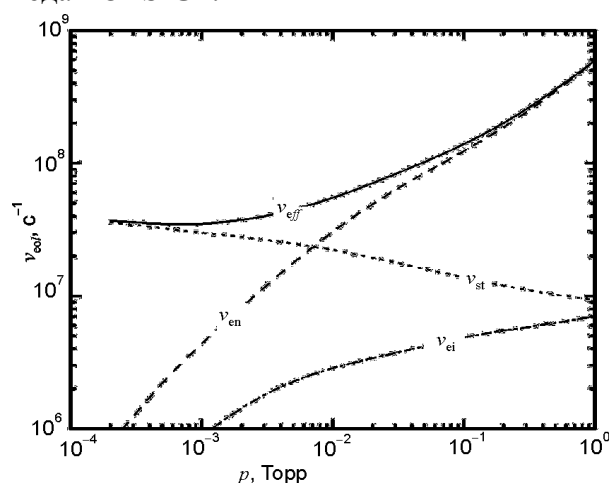


Рис. 2. Зависимость электрон-атомной v_{en} , электрон-ионной v_{ei} и стохастической частоты столкновений v_{st} от давления рабочего газа p при фиксированной мощности $P_{rf} = 70$ Вт. Рабочий газ – аргон, параметры разрядной камеры соответствуют экспериментальным.

Взаимная индуктивность M определяется как [4]:

$$M = \frac{\mu_0 \pi R^2 N}{L}, \quad (7)$$

Геометрическая индуктивность плазменного витка L_2 в первом приближении может быть определена как [4]:

$$L_2 = \frac{\mu_0 \pi R^2}{L}. \quad (8)$$

В случае низкой плотности плазмы, рассматриваемом в данной работе, следует ожидать выполнения неравенства $L_e \gg L_2$ в силу того, что индуктивность L_e обратно пропорциональна плотности плазмы (см. рис. 3г). При подстановке известных выражений для L_2 и L_e [4], данное неравенство приводится к

$$\text{виду:} \quad \frac{4c^2}{\delta R \omega_{pe}^2} \gg 1, \quad (9)$$

где ω_{pe} – электронная плазменная частота, c – скорость света.

Учитывая то, что геометрическая индуктивность плазмы всегда меньше индуктивности индуктора L_0 (для систем с внешним индуктором), выполнение неравенства (9) должно также означать и справедливость утверждения $L_0 \gg \Delta L$. Следовательно, в данном случае на параметры цепи индуктора значимое влияние может оказывать только эффективное сопротивление плазмы R_s , а реактивная часть импеданса плазмы может быть опущена в виду своей малости.

С учетом вышесказанного, выражения для эффективного импеданса индуктора при выполнении неравенства (9) принимают следующий вид:

$$R_s = \frac{\omega^2 M^2 \cdot R_{pl}}{R_{pl}^2 + (\omega L_e)^2}, \quad L_s \approx L_0. \quad (10)$$

В полученных выражениях для эффективного импеданса индуктора отсутствует индуктивность L_2 , что упрощает расчет, поскольку точное определение геометрической индуктивности плазменного витка сопряжено с определенными трудностями, обусловленными неоднородностью плазмы, скин-эффектом и неоднородным распределением магнитного поля в плазме, что в свою очередь приводит к зависимости этой величины от параметров плазмы. Таким образом, выражение (10) позволяет рассчитывать эффективный импеданс индуктора в рассматриваемой области, не прибегая к сложным вычислениям величины L_2 .

С учетом (10) выражение для напряжения на индукторе приобретает следующий вид:

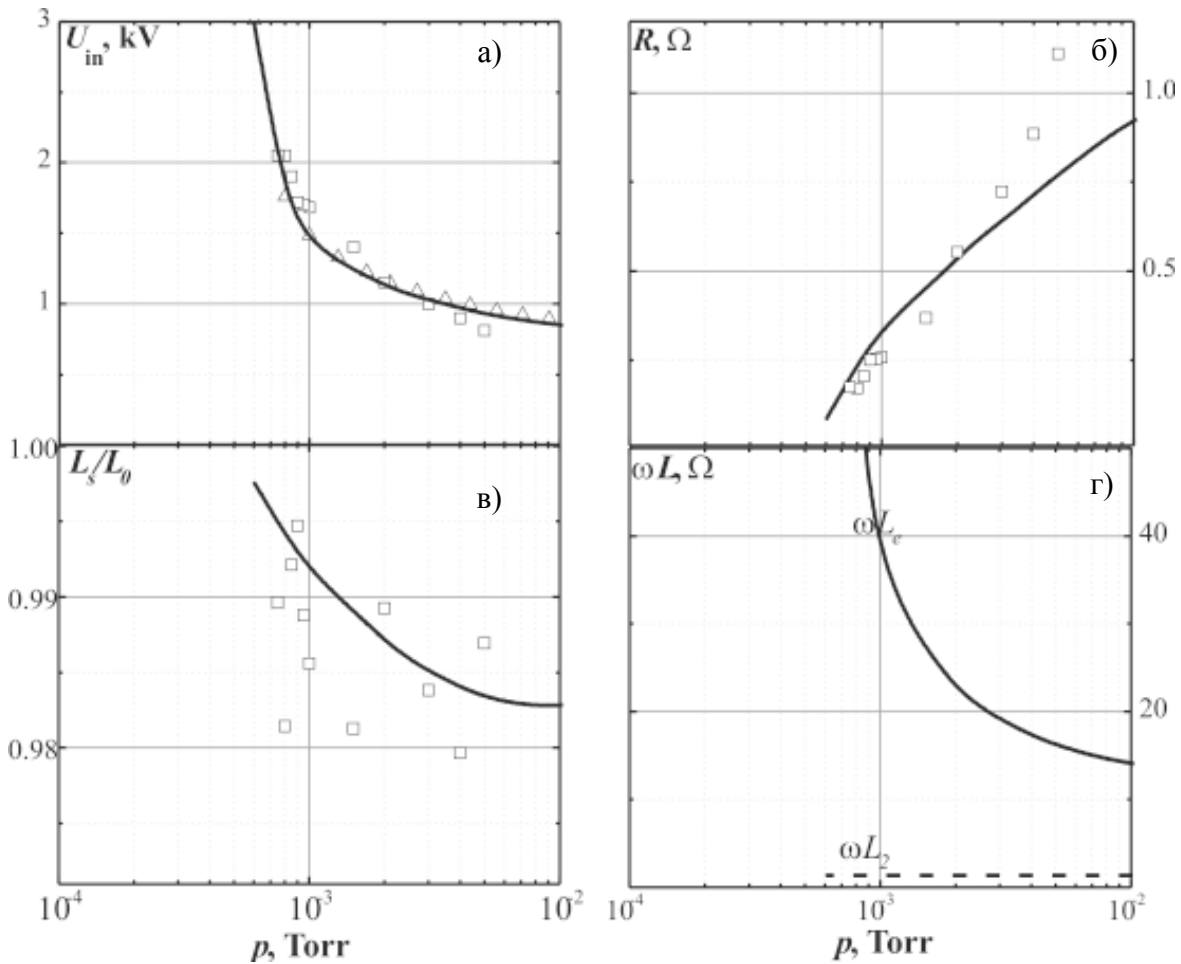


Рис. 3. Электрические характеристики ВЧ цепи индуктора. € – Экспериментальные результаты; Δ – теоретическая кривая, полученная в соответствии с (10); сплошной линией на рис. а) – в) показаны результаты моделирования согласно (4).

$$U_{in} = I_{in} \cdot |R_s + i\omega L_0|, \quad I_{in} = \sqrt{\frac{2P_{rf}}{R_s}}. \quad (11)$$

На рис. 3а показаны зависимости напряжения на индукторе от давления рабочего газа p при фиксированной мощности, подводимой к плазме $P_{rf} = 70$ Вт, рассчитанные с использованием (4) и (10, 11), для описанной выше экспериментальной установки. Как видим, в полученных результатах различий не наблюдается. На рис. 3б, в представлены графики зависимости эффективного сопротивления индуктора и обезразмеренной величины L_s от давления рабочего газа. Можно отметить хорошее согласие теоретических кривых и экспериментальных данных в диапазоне давлений ниже $5 \cdot 10^{-3}$ Торр, в котором реализуется бесстолкновительный режим; при более высоких давлениях длина свободного пробега ионов становится сопоставимой

с размерами разрядной камеры, и бесстолкновительный подход теряет свою применимость.

ВЫВОДЫ

Таким образом, при рассмотрении характеристик цепи ВЧИ разряда в случае низкой плотности плазмы вклад собственной индуктивности плазмы в индуктивность индуктора может быть опущен. При вычислении активной составляющей импеданса плазмы геометрическая индуктивность плазменного витка L_2 может быть также исключена из рассмотрения в виду того, что слагаемое L_e существенно превосходит ее по величине. Область применимости используемого подхода ограничена максимальной мощностью, при которой выполняется условие (9), а так же диапазоном давлений, в котором реализуется бесстолкновительный режим ВЧИ разряда.

ЛИТЕРАТУРА

1. Piejak R.B., Godyak V.A. and Alexandrovich B.M. A simple analysis of an inductive RF discharge//Plasma Sources Sci. and Technol. – 1992. – Vol. 3. – P. 179-186.
2. Denneman J.W. Determination of electromagnetic properties of low-pressure electrodeless inductive discharges//Journal of Physics D: Appl. Physics. – 1990. – Vol. 23, № 3. – P. 293-298.
3. Рафальский Д.В., Положий К.И. Влияние скин-эффекта на импеданс ВЧ индукционного разряда//Вестник Харьковского национального университета им. В.Н. Каразина, серия физическая “Ядра, частицы, поля”. – 2007. – № 763, Вып. 1(33). – С. 69-74.
4. Gudmundsson J.T., Lieberman M.A. Magnetic induction and plasma impedance in a cylindrical inductive discharge//Plasma Sources Sci. Technol. – 1997. – Vol. 6, № 4. – P. 540-550.

ЗБУРЮВАННЯ ІМПЕДАНСУ ІНДУКТОРА, ЯКИЙ ВЗАЄМОДІЄ З ПЛАЗМОЮ НИЗЬКОЇ ЩІЛЬНОСТІ

Д.В. Рафальський, С.В. Дудін, К.І. Положий

У роботі описані експериментальні дослідження імпедансу індуктора в циліндричному джерелі плазми ВЧ індукційного типу. Представлено результати вимірів напруги на індукторі, ефективні індуктивності й опори. Зроблено висновок, що у випадку плазми низької щільності мнимою частиною імпедансу плазми й геометричною індуктивністю плазми можна знехтувати. З використанням цього підходу отримані прості вирази для ефективного імпедансу індуктора, які добре погодяться з експериментальними результатами.

IMPEDANCE DISTURBANCE OF THE INDUCTIVE COIL INTERACTING WITH LOW DENSITY PLASMA

Д.В. Рафальський, С.В. Дудін, К.И. Положий

This paper describes experimental investigations of an inductive coil impedance in the cylindrical inductively coupled low density RF plasma source. Detailed measurements of the inductive coil voltage, effective inductance and resistance are reported. It is concluded that in the case of low plasma density imaginary part of the plasma impedance and geometrical plasma inductance can be neglected. Using this approach simple expressions for the effective inductor impedance have been obtained, being in good agreement with the experimental data.