

ЛАЗЕРНЫЕ И ОПТИЧЕСКИЕ ИЗМЕРЕНИЯ КРАТКИЕ СООБЩЕНИЯ

doi: 10.51639/2713-0568_2021_1_4_18
ГРНТИ 29.31.26

Измерение реактивной составляющей импеданса плазмы лампы-вспышки для твердотельного лазера

Вальшин А. М.

450076, Республика Башкортостан, Уфа, ул. Заки Валиди 32
Башкирский государственный университет

e-mail: editor-laser@nb-bstu.ru

Экспериментально измерена индуктивность плазмы лампы-вспышки для твердотельного лазера при высокочастотной накачке. Обнаружено значение индуктивности, превосходящее теоретические значения величины индуктивной составляющей почти на два порядка. Показано, что измерение реактивной составляющей проводимости наряду с определением активной составляющей проводимости плазмы позволит оценить реальное значение частоты столкновений электронов с нейтральными атомами при разных условиях эксперимента.

Ключевые слова: импеданс плазмы, высокочастотная накачка, индуктивность плазмы.

Для диагностики и измерения характеристик плазмы необходимо определить значения полного разрядного тока, напряжения на разрядном промежутке (т. е. вольт-амперная характеристика разряда) размеры светящихся областей плазмы, а также среднюю проводимость и среднюю электрическую мощность в разряде. Значение импеданса плазмы существенно влияет на точность измерения этих параметров.

В работах [1–3] рассмотрены различные варианты импеданса плазмы. Значения импеданса плазмы, как правило, обозначены в виде чистого активного сопротивления, или как активного сопротивления и индуктивности, реактивное сопротивление которого существенно меньше величины активного сопротивления плазмы, ввиду этого в дальнейшем не учитывается.

Целью данной работы является экспериментальные измерения индуктивной составляющей импеданса плазмы лампы-вспышки твердотельного лазера.

Принцип измерения реактивной составляющей импеданса плазмы заключается в следующем. В высокочастотный генератор с малым выходным сопротивлением последовательно включаются лампа-вспышка и колебательный контур. В начале вместо лампы-вспышки включается эквивалентное омическое сопротивление величиной 1 Ом, далее настройкой частоты генератора добиваемся резонанса в колебательном контуре и определяем резонансную частоту. Далее то же самое проделываем с лампой-вспышкой.

Схема экспериментальной установки для измерения индуктивной составляющей импеданса плазмы приведена на рис. 1. Экспериментальная установка включает в себя 2 блока: Блок дежурной дуги (ВЧГ-1) и блок силовой высокочастотной накачки (ВЧГ-2), которые включены к лампе-вспышке. Оба блока состоят из высокочастотных генераторов

перестраиваемой частоты в пределах 1...3 МГц собственной разработки. Оба генератора работают в непрерывном режиме. В блоке высокочастотной дежурной дуги ВЧГ-1 вырабатываются колебания с амплитудой до 6 кВ при точной настройке частоты ВЧГ-1 на собственную частоту колебательного контура LC , данной амплитуды напряжения достаточно для зажигания лампы. После того как происходит пробой в лампе, зажигается дуговой разряд. После зажигания дуги мы включаем второй генератор ВЧГ-2 к лампе путём замыкания ключа К2. Индуктивность L_x играет роль буферного сопротивления, поскольку его индуктивное сопротивление более чем на порядок превышает импеданс лампы-вспышки. Выходное напряжение второго генератора подключается через последовательный колебательный контур к лампе-вспышке, находящаяся в режиме горения дежурной дуги. После этого мы настраиваем частоту второго генератора ВЧГ-2 на собственную частоту колебательного контура L_0C_0 путём получения максимального тока в контуре и определяем резонансную частоту. Далее мы отключаемся от лампы и включаем вместо лампы эквивалентное активное сопротивление величиной 1 Ом. Резонансная частота, измеренная с активным сопротивлением, оказалась равной 890 кГц. А резонансная частота в случае с лампой оказалось равной 797 кГц.

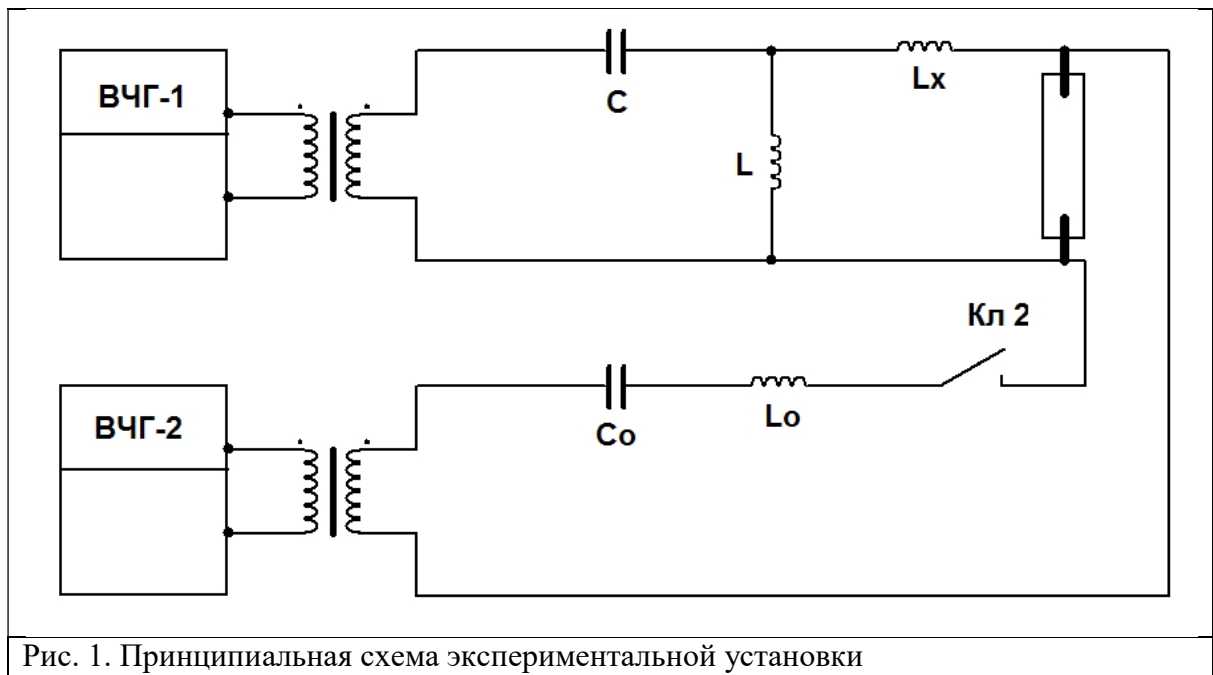


Рис. 1. Принципиальная схема экспериментальной установки

Для расчётов используем известную формулу: $f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_0C_0}}$, $1 = 4\pi f_0^2 L_0 C_0$, и определяем $4\pi f_0^2 L_0 C_0 = 4\pi f_1^2 L_1 C_0$, где:

$$L_1 = \left(\frac{f_0}{f_1}\right)^2 L_0,$$

при $L_1 = L_0 + L_{\text{пл}}$, $L_1 = 1,25L_0$, $L_1 = L_0 + 0,25L_0$, $L_{\text{пл}} = 0,25L_0$.

Значения C_0 и L_0 выбираются из условий резонансной частоты на 890 кГц. В нашем случае L_0 составляла 10 мкГн. Подставляя это значение в последнее уравнение, получаем

$$L_{\text{пл}} = 2,5 \text{ мкГн.}$$

Таким образом нам удалось измерить индуктивность плазмы при высокочастотной накачке.

Теперь оценим величину индуктивности, которую приводят в теоретических работах авторы [3], предполагая, что индуктивность плазмы оценивается как индуктивность

провода, с размерами, совпадающими с размерами плазмы внутри импульсной лампы. Индуктивность прямого провода имеет значение только на высоких частотах, поскольку отрезки такого провода используются для соединения как пассивных, так и активных компонентов и в качестве выводов. Индуктивность прямого провода из немагнитного материала определяется по формуле:

$$L = 0,002l \left[2,3 \log \left(\frac{4l}{d} - 0,75 \right) \right],$$

где l и d длина и диаметр провода в сантиметрах соответственно, а L в мкГн.

В нашем случае размеры лампы ДНП6/60, используемой в нашем эксперименте $l = 6$ см (расстояние между электродами), $d = 0,6$ см (внутренний диаметр трубки), расчётное значение индуктивности плазмы составляет ≈ 42 нГн, а измеренное нами значение индуктивности плазмы составило $\approx 2,5$ мкГн.

Таким образом наш экспериментальный результат показывает, что реальное значение индуктивности плазмы более чем в 40 раз превышает теоретические расчётные значения, на которые ссылаются в работе [3], а в других работах вовсе не учитывают, что является не совсем корректным.

Нами обнаружено существенно большее значение индуктивности, превосходящей теоретические значения величины индуктивной составляющей почти на два порядка. В работе [4] соотношение активной проводимости к реактивной проводимости определяется следующим выражением: $\sigma_a/\sigma_p = R_p/R_a = v_{ea}/\omega$, где σ_a и σ_p – активная и реактивная проводимости плазмы соответственно, R_p и R_a – реактивное и активное сопротивление плазмы соответственно, v_{ea} – частота столкновений электронов с нейтральными атомами, ω – циклическая частота высокочастотного генератора. Действительно, на частотах 13 МГц и выше реактивное сопротивление меньше активного сопротивления и при дальнейшем повышении частоты можно не учитывать реактивную составляющую. Однако на частотах порядка МГц реактивное сопротивление становится существенно больше, чем активное сопротивление. В нашем случае измерение реактивной составляющей проводимости наряду с определением активной составляющей проводимости плазмы позволит оценить реальное значение частоты столкновений электронов с нейтральными атомами при разных условиях эксперимента, а не ссылаться на усреднённые расчётные значения.

Результаты, полученные в этой работе, требуют дальнейших экспериментальных исследований и теоретических обоснований полученных результатов, что планируется выполнить в ближайшее время.

Конфликт интересов

Автор статьи заявляет, что у него нет конфликта интересов по материалам данной статьи с третьими лицами, на момент подачи статьи в редакцию журнала, и ему ничего не известно о возможных конфликтах интересов в настоящем со стороны третьих лиц.

Список литературы

1. Кралькина Е. А. Индуктивный высокочастотный разряд низкого давления и возможности оптимизации источников плазмы на его основе УФН. 178, 519 (2008).
2. Импульсные источники света / под общ. ред. И. С. Маршака, 2 изд. М.: Энергия, 1978. 478 с.
3. Рухадзе А. А., Александров А. Ф. Физика сильноточных электроразрядных источников света Изд.2.М.: Книжный дом «ЛИБРОКОМ», 2012. 184 стр.

Лазеры. Измерения. Информация. 2021. Том № 01. № 04 (04)
<https://lasers-measurement-information.ru>

4. Райзер Ю. П., Шнейдер М. Н., Яценко Н. А. Высоочастотный емкостный разряд: Физика. Техника эксперимента. Приложения. М.: Изд-во МФТИ; Наука–Физматлит, 1995. 320 с.

Measurement of the reactive component of the plasma impedance of a flash lamp for a solid-state laser

Valshin A. M.

450076, Republic of Bashkortostan, Ufa, st. Zaki Validi 32
Bashkir State University

The plasma inductance of a flash lamp for a solid-state laser under high-frequency pumping is experimentally measured. The value of the inductance is found to be almost two orders of magnitude higher than the theoretical values of the inductive component. It is shown that the measurement of the reactive component of the conductivity, along with the determination of the active component of the plasma conductivity, will make it possible to estimate the real value of the frequency of collisions of electrons with neutral atoms under different experimental conditions.

Key words: plasma impedance, high-frequency pumping, plasma inductance.