

УДК 621.32

ПОВЫШЕНИЕ КПД ВВОДА ЭНЕРГИИ В ПЛАЗМУ РАЗРЯДА И СВЕТООТДАЧИ ЛЮМИНЕСЦЕНТНОЙ ЛАМПЫ ПРИ ВЫСОКОЧАСТОТНОЙ НАКАЧКЕ

А. М. Вальшин^{1,2}, С. М. Першин³, Г. М. Михеев²

Впервые экспериментально обосновано, что безэлектродная индукционная накачка плазмы стандартных цилиндрических люминесцентных ламп обеспечивает оптимизацию режима высокочастотного индуктивно-емкостного (ВЧИ) разряда. Выявлены допустимый диапазон частот и влияние емкости между индуктором и плазмой на эффективность резонансного ввода энергии в плазму разряда. Показано повышение до 25% КПД светоотдачи в области значений мощности накачки, кратно меньшей номинальной для лампы в стандартном режиме работы. Обсуждается физика обнаруженного явления и область применения энергосберегающей технологии безэлектродной накачки люминесцентных ламп с повышенным ресурсом работы.

Ключевые слова: ввод энергии в плазму индуктивно-емкостного разряда, высокочастотная безэлектродная накачка люминесцентных ламп.

Люминесцентные лампы (ЛЛ) с внутренними электродами являются одним из самых эффективных и широко применяемых источников света. Трубчатые прямые ЛЛ, работающие на переменном токе частотой от 50 Гц до 50 кГц и на мощностях от 13 до 80 Вт, имеют хорошие цветовые характеристики и высокий КПД светоотдачи, до 100 лм/Вт [1–4]. С начала 80-х годов ведется разработка безэлектродных газоразрядных люминесцентных источников света, в которых плазма индукционного разряда возбуждается в трубке внешним высокочастотным (ВЧ) индуктором. Установлено, что ресурс индукционных ламп, 60000–100000, часов значительно превышает срок службы тради-

¹ Башкирский государственный университет, 450074 Россия, Уфа, ул. Заки Валиди, 32.

² Институт механики УРО РАН, г. Ижевск.

³ ИОФ РАН, 119991 Россия, Москва, ул. Вавилова, 38; e-mail: pershin@kapella.gpi.ru.

ционных ЛЛ [5–7], что является весьма перспективным фактором. Спустя десятилетие появились первые серийные образцы безэлектродных индукционных люминесцентных ламп (ИЛЛ).

Однако во всех ИЛЛ индуктор, как правило, содержит ферритовый сердечник, или даже два, а люминесцентная лампа имеет особую конструкцию. В работах [8, 9] экспериментально и теоретически исследована физика индукционных разрядов низкого давления в парах ртути и инертного газа в широком диапазоне частот ВЧ поля, зависимость мощности лампы от давления инертного газа, вариации конструкции ламп и ВЧ индуктора.

В данной работе представлены результаты экспериментального исследования индукционного высокочастотного разряда в газоразрядной плазме низкого давления в стандартных трубчатых люминесцентных лампах с целью выяснения механизма возникновения E - и H -разрядов и их перехода из одного режима в другой, а также возможности создания безэлектродных газоразрядных люминесцентных источников света с повышенным КПД светоотдачи и ресурсом работы.

Эксперимент. В работе, в отличие от [8, 9], использовали люминесцентные лампы диаметрами 38 мм, 26 мм и 16 мм и длиной 600 мм, выпускаемые фирмами Osram и Tungsram. В нашем случае в качестве индуктора использовался соленоид, который наматывали вокруг трубки люминесцентной лампы. Число витков варьировали от 31 до 90, в зависимости от диаметра и длины трубки. В отличие от других работ [7–11], в которых экспериментальная установка состояла из мощного генератора высокой частоты с выходным сопротивлением 50 Ом или 75 Ом и выходной мощностью несколько кВт, особое внимание мы обратили на согласующее устройство с подстраиваемыми параметрами в цепи высокочастотного индуктивного (ВЧИ) разряда.

Согласующее устройство, как правило, представляет собой резонансный колебательный П-контур (СЛС контур с перестраиваемыми емкостями), который обеспечивает согласование фиксированного выходного сопротивления ВЧ генератора с комплексным импедансом плазмы. Физически ясно, что из-за индуктивной связи импеданс плазмы является составной частью импеданса индуктора в цепи согласующего устройства, который, в свою очередь, зависит от параметров плазмы. Отсюда следует, что настройка элементов согласующего устройства, а также амплитуды ВЧ тока и напряжения индуктора зависят от параметров разряда, давления и сорта рабочего газа, поглощаемой разрядом ВЧ мощности и т.д. В работах [10, 11] проведены теоретические и экспериментальные исследования возмущения импеданса индуктора, определены основные

составляющие импеданса плазмы и предложена феноменологическая модель импеданса плазмы ВЧИ разряда с учетом влияния скин-эффекта.

В работе мы использовали ВЧ генератор собственной разработки с выходным сопротивлением не более 5 Ом, частоту которого перестраивали от 1 до 7.7 МГц. При этом стабильность частоты во всём диапазоне перестройки была не хуже 0.3%. Достигнутая нами стабильная работа ВЧ генератора с низкоомным выходом позволила нам отказаться от специального согласующего устройства для накачки ВЧИ плазмы в трубке лампы. В нашем случае выход генератора соединён с последовательным колебательным контуром. В качестве индуктивности мы использовали индуктор, который представляет собой соленоид из провода МГТФ диаметром 1 мм, намотанного на трубку ЛЛ вдоль ее оси с шагом порядка 10 мм. Такой шаг намотки создавал некоторую экранировку светоотдачи, которая была эквивалентна укорочению 600 мм лампы на 30–90 мм (~10%). Вариация ёмкости контура осуществлялась с помощью высокочастотных переменных керамических конденсаторов.

На стадии предварительных опытов было установлено, что тривиальным повышением мощности накачки не удаётся “зажечь” однородный безэлектродный разряд электрическим полем индуктора. Как правило, повышение накачки сопровождалось формированием одного или нескольких отдельно локализованных ярких кольцевых разрядов в плоскости витка. Однако в области некоторых значений резонансных частот накачки был обнаружен режим зажигания разряда и свечения лампы по всей длине трубки. Физически ясно, что изменение импеданса столба разряда при вариации мощности в цепи ВЧ питания лампы допускает максимизацию ввода энергии накачки при подборе оптимального значения ёмкости резонансного контура питания.

Мы провели систематическое исследование зависимости светоотдачи (энергии излучения) лампы от мощности ВЧИ накачки в области резонансных частот и сравнение параметров в одинаковой геометрии измерения с паспортным режимом питания лампы промышленной сетью на частоте 50 Гц. При этом мощность ВЧ накачки измеряли как разницу потребляемой мощности ВЧ генератора при питании лампы с разрядом и без него. Тепловые потери на подводящих проводах не принимались во внимание. Мощность, потребляемую люминесцентной лампой на частоте 50 Гц, измеряли вольтметром и амперметром непосредственно на лампе. Энергию излучения люминесцентной лампы (в относительных единицах) в обоих режимах питания измеряли фотодиодом ФД-24 в одинаковой геометрии. Для этого фотодиод размещали на расстоянии 3 см от оси трубки перпендикулярно к ней на равном удалении от торцов лампы.

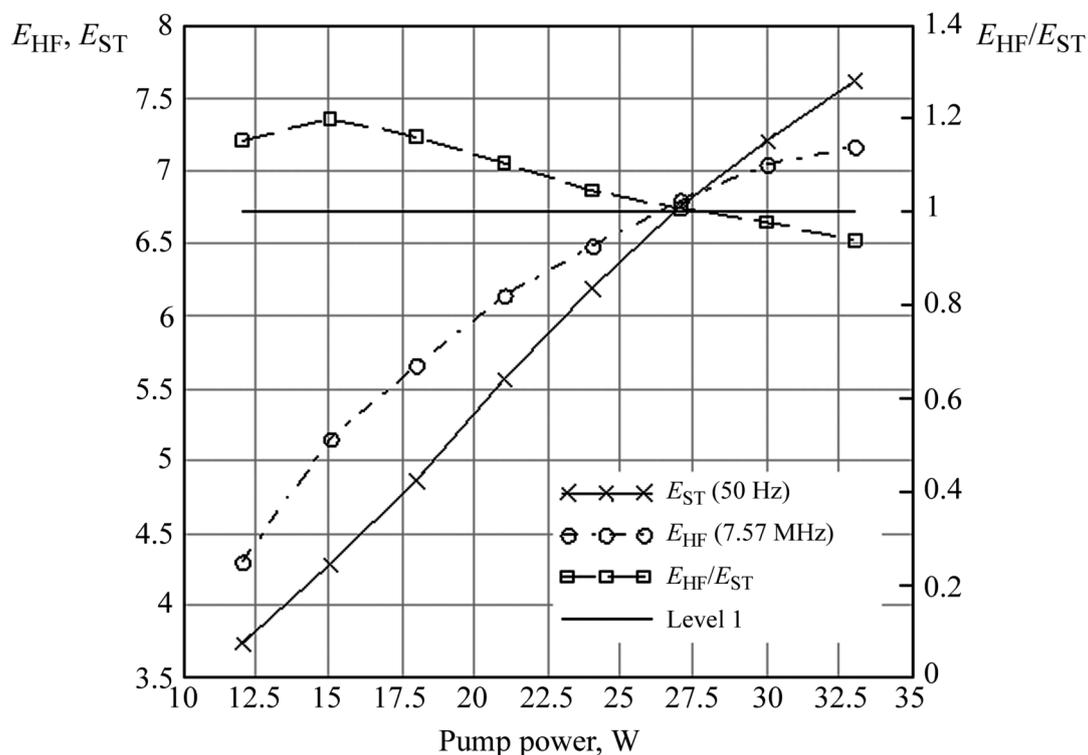


Рис. 1: Зависимость светоотдачи (энергии излучения) лампы (OSRAM HO 24 W, диаметр $D = 16$ мм, длина $L = 600$ мм, число витков соленоида $N = 90$, резонансная частота зажигания разряда $f_{res} = 7.57$ МГц, диапазон частот максимального КПД от 7.22 до 7.42 МГц) от мощности ВЧИ накачки (полые круги) и при стандартном режиме (50 Гц) питания с электродами (крестики), а также их отношения (полые квадраты).

Результаты и обсуждения. Экспериментальные результаты приведены на рис. 1 и 2. Как видно из рис. 1, энергия излучения люминесцентной лампы (OSRAM HO 24 W, диаметр $D = 16$ мм, длина $L = 600$ мм, число витков соленоида $N = 90$, резонансная частота зажигания разряда $f_{res} = 7.57$ МГц), в диапазоне частот максимального КПД от 7.22 до 7.42 МГц при ВЧИ накачке (круги) превышает энергию излучения лампы при стандартной (50 Гц, с электродами) накачке (крестики) в области малых (~ 15 Вт) значений мощности накачки. Отношение этих зависимостей (рис. 1, квадраты) наглядно показывает, что выигрыш в КПД светоотдачи достигает величины почти 25%. Существенно, что этот фактор энергосберегающих технологий достигается в области значений накачки кратно меньше номинально вводимой в разряд плазмы (до 33 Вт, см. рис. 1).

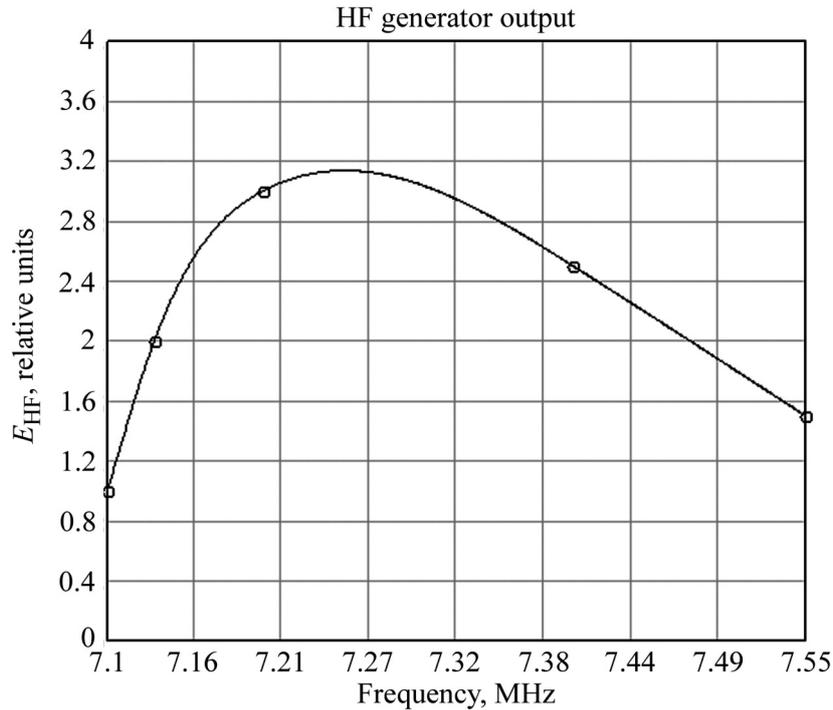


Рис. 2: Диапазон частот максимальной светоотдачи (энергии излучения) лампы.

Параметр резонансной частоты $f_{\text{res}} = 7.57$ МГц означает, что при настройке на эту частоту в колебательном контуре происходит резонансное увеличение напряжения до величины порога “зажигания” плазма разряда в люминесцентной лампе, при которой возникает продольное слабое свечение. Далее посредством вторичной подстройки частоты генератора мы достигаем максимальной мощности излучения для данной накачки. Значения частот $f_{\text{min}} = 7.22$ МГц и $f_{\text{max}} = 7.42$ МГц означают резонансные частоты для минимальной и максимальной мощности накачки, соответственно (рис. 2). Заметим, f_{res} всегда больше, чем f_{max} , так как после зажигания плазмы колебательный контур дополняется емкостью между плазмой и индуктором, а также определённым импедансом самой плазмы для этого значения накачки.

Резонансная зависимость энергии излучения лампы от частоты ВЧ накачки (см. рис. 2) показывает сравнительно широкий диапазон резонансных частот поддержания выигрыша КПД светоотдачи лампы, что важно для её устойчивой работы при обратимой девиации или флуктуации других параметров накачки и разряда. Отметим, что здесь нет фактора необратимых потерь как в стандартной лампе с питанием разряда через электроды, которые испаряются по мере наработки ресурса. При этом визуально видно как испаренный металл электродов загрязняет концевые участки люминофора,

которые необратимо уменьшают светоотдачу лампы и ограничивают ресурс работы лампы. Безэлектродный режим поджига и поддержания разряда плазмы функционирует без электродов, что существенно увеличивает время работы лампы, и весьма значительно.

Выводы. Таким образом, впервые, насколько нам известно, предложен и экспериментально обоснован на примере стандартных люминесцентных ламп режим зажигания разряда низкого давления в цилиндрических трубках при высокочастотной индукционной накачке малой мощности (десятки Ватт). Выявлен диапазон (6–8 МГц) резонансных частот зажигания и удержания плазмы разряда, в котором достигается выигрыш до 25% в КПД светоотдачи лампы по сравнению со стандартным (с электродами) питанием лампы на промышленной частоте 50 Гц. Существенно, что максимум КПД достигается в области мощности накачки, которая кратно меньше номинального значения потребления лампы.

Совокупность полученных результатов, а также увеличенный ресурс работы, который в стандартных лампах ограничен испарением электродов и разрушением спирали, даёт основание применения разработанной энергосберегающей технологии для освещения крупных промышленных комплексов. Важным фактором является снижение экологической нагрузки при утилизации ламп из-за увеличения срока работы, а также возможность безэлектродной накачки при повторном использовании ламп с уже сгоревшими электродами, сообщение о которой готовится к печати.

Несомненно, что особый интерес здесь возникает из-за возможности применения обнаруженного режима зажигания разряда и накачки плазмы в безэлектродных цилиндрических трубках для специального применения, например, в плазменных антеннах [14], а также газоразрядных лазерах.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (грант 14-02-00748а).

Л И Т Е Р А Т У Р А

- [1] Ф. А. Фабрикант, УФН **27**(2), 159 (1945).
- [2] Д. Уэймаус, *Газоразрядные лампы* (М., Энергия, 1977).
- [3] Ю. П. Райзер, *Физика газового разряда* (М., Наука, 1987).
- [4] Г. Н. Рохлин, *Разрядные источники света* (М., Энергоатомиздат, 1991).
- [5] J. Hopwood, Plasma Sources Sci. Technol. **1**(2), 109 (1992).
- [6] J. H. Keller, Plasma Sources Sci. Technol. **5**(2), 166 (1996).
- [7] V. Godyak, Plasma Phys. Control. Fusion **45**(12A), A399 (2003).
- [8] Е. А. Кралькина, УФН **178**(5), 519 (2008).

- [9] О. А. Попов, Исследование и разработка индукционных люминесцентных источников света на частотах 100–15000 кГц. Диссерт. на соискание степени доктора технических наук (Москва, МЭИ, 2011).
- [10] Д. В. Рафальский, С. В. Дудин, К. И. Положий, *Физ. инженерия поверхн.* **6**(3-4), 155 (2008) [D. V. Rafalsky, S. V. Dudin, K. I. Polozhiy, *Journal of Surface Physics and Engineering* **6**(3-4), 155 (2008)].
- [11] Д. В. Рафальский, К. И. Положий, *Вестник Харьковского университета* № 763, 69 (2007).
- [12] R. V. Piejak, V. A. Godyak, B. M. Alexandrovich, *Plasma Sources Sci. Technol.* **1**(3), 179 (1992).
- [13] J. T. Gudmundson, M. A. Liberman, *Plasma Sources Sci. Technol.* **6**(4), 540 (1997).
- [14] В. Н. Коновалов, Г. П. Кузьмин, И. М. Минаев и др., *Инженерная физика (Физика плазмы)*, № 5, 49 (2015).

Поступила в редакцию 22 марта 2016 г.