

ИССЛЕДОВАНИЕ РАБОТЫ МОЩНЫХ АМАЛЬГАМНЫХ ИСТОЧНИКОВ БАКТЕРИЦИДНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ НИЗКОГО ДАВЛЕНИЯ НА ЧАСТОТЕ 40 КГЦ.

Костюченко С.В.(1), Кузьменко М.Е. (kme@npo.lit.ru)(2), Печеркин В.Я.(1).

(1) НПО «ЛИТ», (2) Московский Физико-Технический Институт.

Уже несколько десятилетий УФ излучение ртутного разряда низкого давления используется для обеззараживания воды, воздуха и других сред. Обусловлено это высоким бактерицидным эффектом излучения атома ртути с длиной волны 254 нм (переход $6^3P_1-6^1S_0$) [1] и высоким КПД преобразования электрической энергии в бактерицидное излучение [2]. Увеличение интереса к ртутному разряду низкого давления обусловлено разработкой и внедрением источников УФ излучения с повышенной мощностью более 100 Вт [3]. С другой стороны, прогресс в силовой микроэлектронике привел к внедрению в технику электронных пуско-регулирующих аппаратов (ЭПРА) для зажигания и поддержания разряда в лампе. При этом, частота тока, генерируемого ЭПРА, составляет несколько десятков килогерц. Повышение частоты по сравнению с промышленной частотой 50 Гц приводит к появлению ряда особенностей в работе источников бактерицидного излучения.

Для КПД источника излучения важны не только процессы в положительном столбе разряда, но и приэлектродные процессы. При повышении частоты разряда свыше нескольких сотен Гц уменьшается анодное падение напряжения, и, соответственно, увеличивается суммарный КПД лампы [4]. Уменьшение энерговыделения в прианодной области может приводить к увеличению срока службы электродов ламп, что особенно важно для излучателей с большими токами.

Увеличение частоты изменяет процессы в плазме разряда. Выполненные в [5] расчеты показывают, что в случае, когда

$$\tau_D^{-1} \ll \tau^{*-1} < \omega \ll \tau_E^{-1} \quad (1)$$

где τ_D - время амбиполярной диффузии в плазме, τ^* - среднее эффективное время жизни возбужденного состояния атома ртути, определяемое радиационным распадом и перепоглощением резонансного излучения, τ_E - время релаксации энергии электронов ($\tau_E \approx 2$ мкс, $\tau^* \approx 25$ мкс, $\tau_D \approx 5$ мс), ω - круговая частота разряда, концентрация возбужденных атомов слабо меняется во времени, и, из-за нелинейной зависимости скорости возбуждения атома ртути от температуры электронов, эта концентрация оказывается соответствующей максимальной температуре электронов за период. По сравнению с разрядом постоянного тока, концентрация возбужденных атомов в разряде, удовлетворяющем (1), достигается при более низкой средней электронной температуре. Соответственно, уменьшаются потери

энергии электронов в упругих столкновениях. Совместное влияние этих факторов должно приводить к увеличению эффективности разряда, удовлетворяющего (1), по сравнению с разрядом постоянного тока, и максимальное значение КПД согласно расчетам [5] получается при частоте разрядного тока несколько десятков кГц.

В данной работе исследуются электроизлучательные параметры мощных источников бактерицидного излучения с разрядом в виде дуги низкого давления в парах ртути и инертного газа при питании током с частотой 40 кГц. Характеристики разряда сравниваются с характеристиками, получаемыми на промышленной частоте 50 Гц.

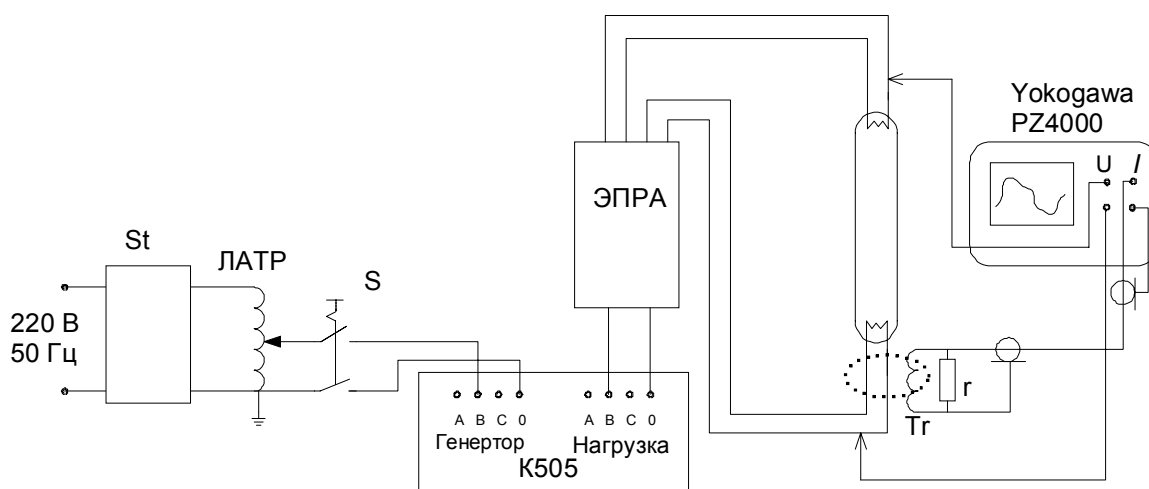


Рисунок 1. Схема измерения электрических параметров разряда.

Схема измерения параметров разряда показаны на рисунке 1. Питающее напряжение через стабилизатор St, ЛАТР и комплект измерительный K505 подается на ЭПРА. Стабилизатор совместно с ЛАТРОм позволяет установить и поддерживать напряжение 220 В для питания ЭПРА. ЭПРА представляет собой специально разработанную электронную схему, обеспечивающую инициирование и поддержание разряда в разрядной трубке при частоте тока ~40 кГц. Измерение тока разряда осуществляется при помощи предварительно откалиброванного токового трансформатора Tr и соединенного с ним резистора r. Напряжение на разрядной трубке и на резисторе r вводятся в анализатор мощности Yokogawa PZ4000, который позволяет оцифровывать аналоговые сигналы тока и напряжения с частотой до 5 МГц, сохранять оцифрованные значения в памяти (10^6 пар значений) и находить эффективную мощность разряда на повышенной частоте (в нашем случае – 40 кГц). Нахождение электрической мощности производится встроенным в PZ4000 специализированным микропроцессором, который находит среднюю за период T мощность $P = \frac{1}{T} \int_0^T IU dt$, численно интегрируя сохраненные в памяти прибора мгновенные значений тока и напряжения.

Комплект измерительный К505 позволяет измерять мощность и ток, потребляемые всей схемой от сети. Погрешность определения тока разряда и его мощности составляет 2%, напряжения – 0.5%. В комплект измерительный К505 входят стрелочные вольтметр, амперметр и ваттметр, класс точности 0.5.

Излучение разряда во времени регистрировалось с помощью монохроматора МУМ и ФЭУ-100, сигнал с которого записывался на осциллографе Tektronix TDS 640A. Время нарастания сигнала системы регистрации излучения рассчитывалось по постоянной времени RC-цепочки, образованной подсоединенным к выходу ФЭУ резистору и входной емкости осциллографа. Оно равно 0.4 мкс, что существенно меньше характерного времени изменения разряда 25 мкс. Средняя мощность УФ излучения регистрировалась при помощи прошедшего метрологическую аттестацию во ВНИИОФИ фотоэлемента Ф-29.

Экспериментальные разрядные трубки выполнены из кварца с внешним диаметром 19 мм и толщиной стенки 1.2 мм. Межэлектродное расстояние составляет 1450 мм. Электроды представляют собой вольфрамовые триспирали, покрытые смесью из оксидов щелочных металлов для уменьшения работы выхода электронов. Наполнение – смесь неона и аргона. Для поддержания давления ртути на оптимальном уровне используется специально подобранная амальгама [3], закрепленная на стенке разрядной трубки на расстоянии 20 см от каждого электрода. Электрическая мощность разряда - более 200 Вт.

Зажигание разряда в лампе в начале каждого периода переменного напряжения зависит от исходной ионизации плазмы. Так как время амбиполярной диффузии в плазме разряда низкого давления имеет порядок миллисекунды, оно меньше, чем период сетевого напряжения в случае частоты 50 Гц и намного больше периода изменения тока в случае частоты в несколько десятков кГц. Этим объясняется различное временное поведение разрядных токов и напряжений на разрядной трубке для двух таких типов разрядов (рис. 2 и 3). При переходе от частоты 50 Гц к 40 кГц пропадают пики напряжения из-за перезажигания лампы, а ток и напряжение - синфазны, $\cos \varphi = 1$.

На рис. 2 и 3 также приведены осциллограммы излучения разряда на линии с длиной волны 254 нм. При такой частоте интенсивность излучения не падает до нуля, оно составляет в минимуме 0.48 от максимального значения. На рисунке 4 представлены отношения излучения в максимуме к минимальным значениям для некоторых ртутных линий в разряде.

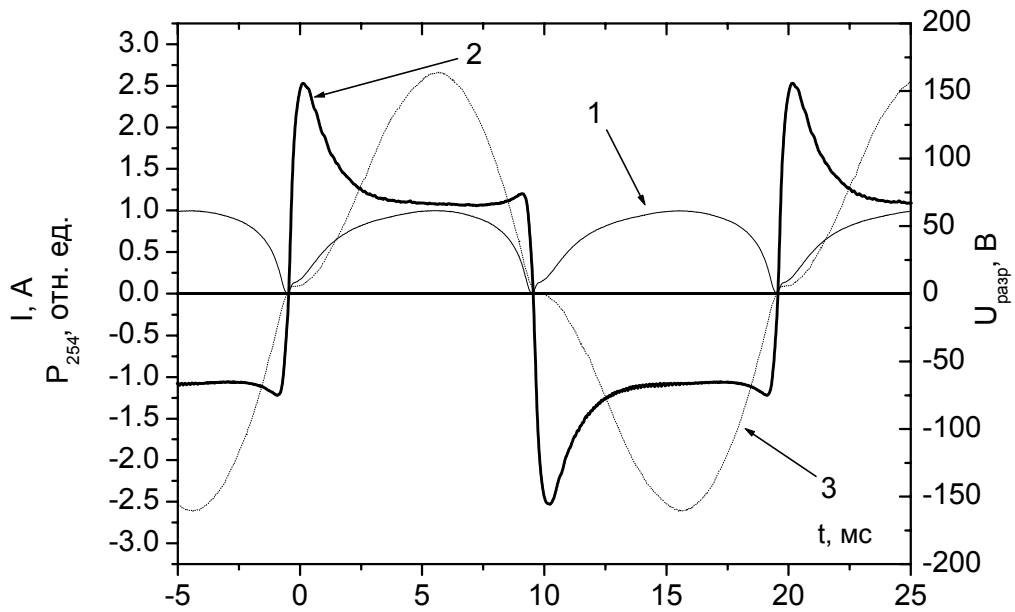


Рисунок 2. Осциллограммы тока, напряжения в разряда и резонансного излучения атома рутти при частоте тока 50 Гц: 1 – излучение с длиной волны 254 нм, 2 – напряжение на разрядной трубке, 3 – ток разряда.

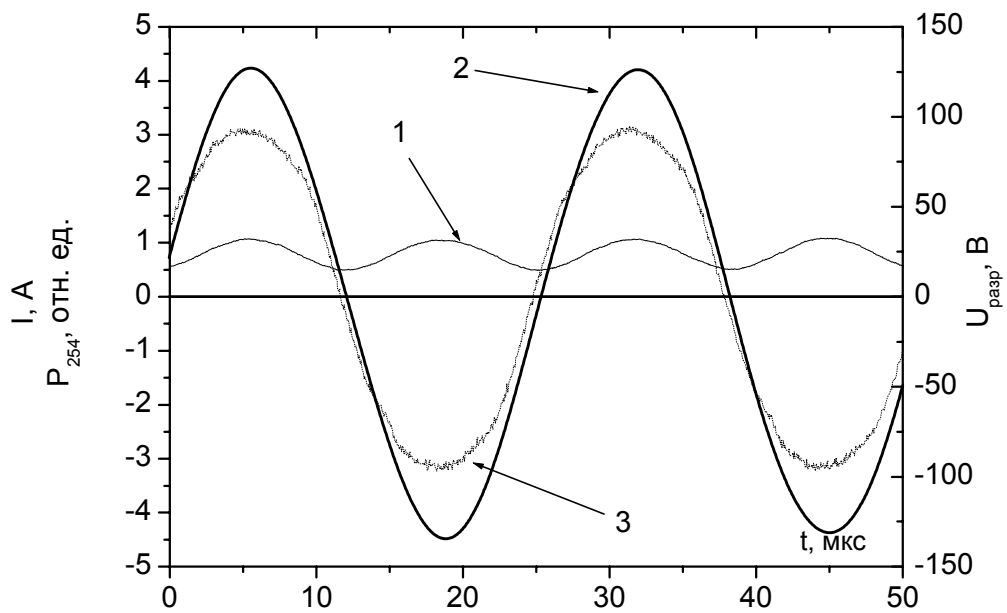


Рисунок 3 Осциллограммы тока, напряжения в разряда и резонансного излучения рутти при питании ЭПРА (частота 40 кГц):
1 – излучение с длиной волны 254 нм,
2 – напряжение на разрядной трубке, 3 – ток разряда.

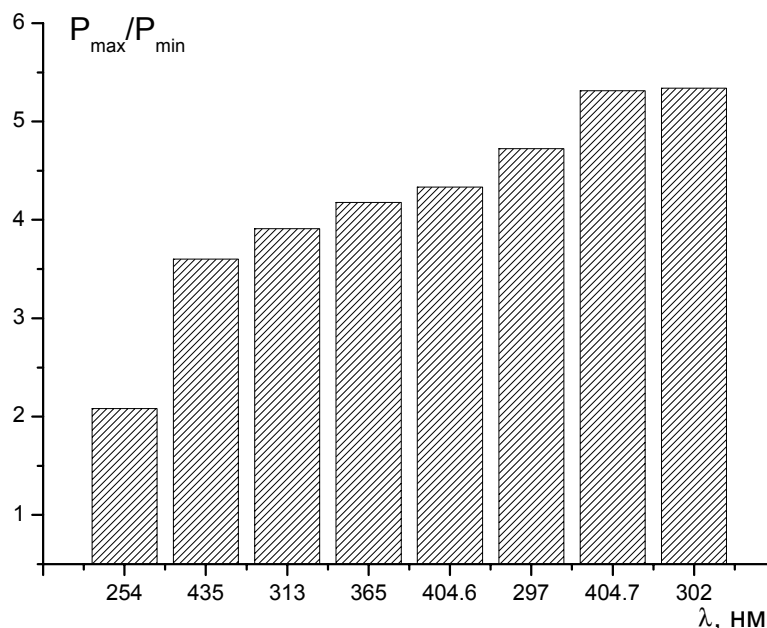


Рисунок 4. Отношения максимальной мощности излучения к минимальной за период тока для разных спектральных линий. Частота 40 кГц.

Влияние большого времени жизни возбужденных состояний проявляется наиболее сильно для линии 254 нм, однако и для оптически тонких линий излучение не падает до нуля. Большие колебания интенсивности излучения атома ртути на длине волны 254 нм свидетельствуют о значительном изменении концентрации возбужденных атомов за период тока.

При использовании ЭПРА, работающего на частоте несколько десятков кГц, обнаружено отличие в поведении излучения разряда от температуры поверхности разрядной трубки (и, соответственно, от концентрации ртути в ней) от случая работы на частоте 50 Гц. Измерялись зависимости излучения от температуры трубки с различными составами амальгамы, разрядный ток составлял 1.7÷1.8 А, мощность на единицу длины равна 1.2÷1.3 Вт/см. Температура стенки изменялась путем увеличением температуры окружающего воздуха. Полученные результаты представлены на рисунке 5.

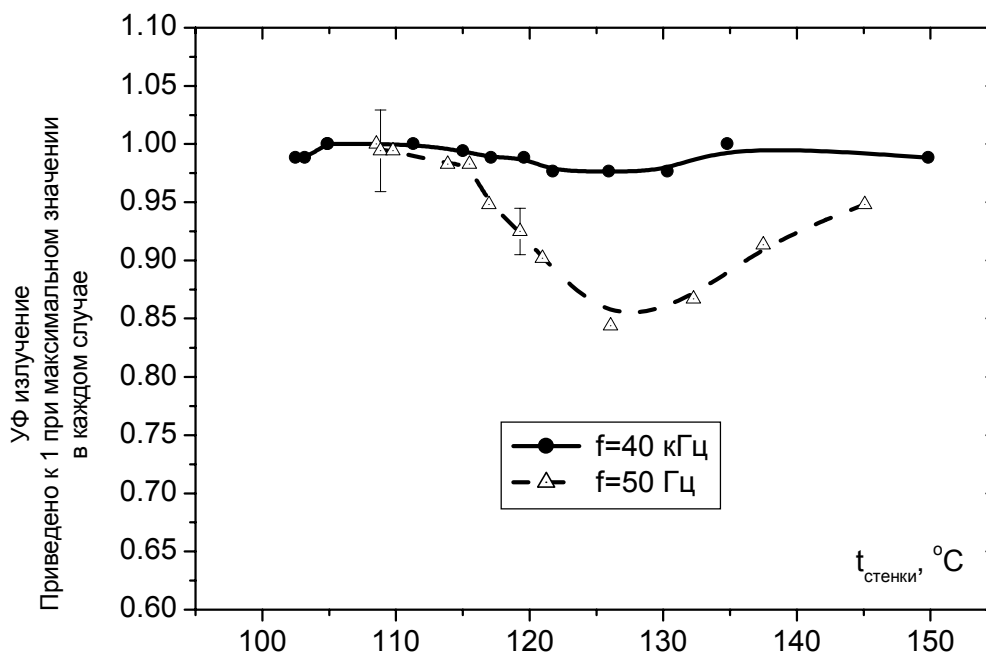


Рисунок 5. Зависимость излучения от температуры стенки разрядной трубки при постоянной мощности разряда для частоты тока 50 Гц и 40 кГц.

Два максимума излучения обусловлены немонотонной зависимостью давления ртути над амальгамой от ее температуры. Тем не менее, на частоте 40 кГц между двумя максимумами практически нет провала по излучению, в отличие от разряда с частотой 50 Гц.

Возможное объяснение такого поведения разряда заключается в менее резкой зависимости излучения разряда на повышенной частоте от концентрации паров ртути, чем для низкочастотного разряда. Изменение температурного режима амальгамы, например, из-за нагрева токами Фуко, не привело бы к наблюдаемому эффекту. Оно могло бы лишь сдвинуть кривые по температуре.

Рассмотрим теперь, как меняется КПД выхода УФ излучения разряда при увеличении частоты. Ниже приведены экспериментальные результаты для разрядных трубок с межэлектродным расстоянием 570 мм и 1450 мм при питании током с частотой 50 Гц и 40 кГц.

В таблице 1 приведены данные, полученные на двух частотах питающего напряжения при сохранении разрядного тока и мощности разряда при межэлектродном расстоянии 570 мм. Вместе с параметрами разряда приведено относительное уменьшение излучения при переходе от частоты

40 кГц к 50 Гц $\Delta_{ЭПРА-ЭмПРА}^{254} = \frac{P_{254}^{40кГц} - P_{254}^{50Гц}}{P_{254}^{40кГц}} \cdot 100\%$. При сохранении тока падают

напряжение на разрядной трубке и мощность разряда. Это обусловлено, в основном, уменьшением приэлектродного падения напряжения. При этом излучение возрастает на 4.2%, а мощность разряда – падает на 8.2%.

Таблица 1 Параметры разряда на частоте 50 Гц (ЭМПРА) и 40 кГц (ЭПРА) давление смеси 40% Ne 60% Ar 1.5 торр, амальгама 5% Hg 95% In.

$f_{\text{разр}}$	$I_{\text{разр}}$, А	$P_{\text{разр}}$, Вт	$U_{\text{разр}}$, В	$P_{\text{разр}}/I_{\text{разр}}$, В	P_{254} , Вт	$\Delta^{254}_{\text{ЭПРА-ЭМПРА}}$, %
50 Гц	2.44	133	66.8	54.5	40.9	4.2
50 Гц	2.20	121	68.5	55.0	40.2	5.7
40 кГц	2.44	121	50.0	50.0	42.7	-

Для сохранения мощности разряда необходимо поднять ток для компенсации уменьшения приэлектродного падения потенциала – на 9.8%. Из-за изменения формы напряжения и $\cos\phi$ сравнивать только падение напряжения нельзя. Поэтому, в таблице дополнительно указаны отношения $P_{\text{разр}}/I_{\text{разр}}$.

Измерения для трубки с межэлектродным расстоянием 1450 мм на частоте 50 Гц выполнены на трансформаторе рассеяния, который обеспечивает зажигание и поддержание разряда от сети 220 В. Полученное увеличение КПД выхода излучения еще больше, чем в предыдущем случае (см. табл. 2).

Таблица 2 Параметры разряда на частоте 50 Гц (ЭМПРА) и 40 кГц (ЭПРА) давление смеси 30% Ne 70% Ar 2.7 торр, амальгама 10% Hg 90% In.

$f_{\text{разр}}$	$I_{\text{разр}}$, А	$P_{\text{разр}}$, Вт	$U_{\text{разр}}$, В	P_{254} , Вт	$\Delta^{254}_{\text{ЭПРА-ЭМПРА}}$, %
50 Гц	2.05	228	139.8	76.5	18.3
40 кГц	2.05	237	115.6	93.6	

Таким образом, обнаружено, что применение электронного ПРА с частотой 40 кГц позволяет расширить температурную область использования источника такого типа по сравнению с разрядом на 50 Гц. Увеличение частоты разряда позволяет увеличить кпд и мощность УФ излучения на 5÷18% по отношению к излучению разряда на промышленной частоте. Уменьшается провал излучения за период изменения разрядного тока. Применение ЭПРА позволяет инициировать и поддерживать разряд для разрядных трубок с высокими падениями напряжения на них. Уменьшение тепловой нагрузки на катод при использовании ЭПРА может увеличить срок службы электродов мощных источников УФ излучения на основе ртутного разряда низкого давления

Литература.

- 1 Справочная книга по светотехнике под редакцией Ю.Б. Айзенберга. Москва. Энергоатомиздат. 1995. 528 с.
- 2 Миленин В.М., Тимофеев Н.А Плазма газоразрядных источников света низкого давления / Ленинград. изд. Ленинградск. Университета. 1991. 240 с.

3 Кузьменко М.Е., Митичкин О.В., Безлепкин А.И., Костюченко С.В., Кудрявцев Н.Н., Печеркин В.Я. / Экспериментальное исследование амальгамной лампы низкого давления при повышенной мощности разряда // ТВТ, 2000. Т.38. № 3. С. 510-513

4 Д. Уэймаус. Газоразрядные лампы. Москва. Энергия. 1977. 344 с.

5 Drop P.C., Polman J. / Calculation on the effect of supply frequency on the positive column of a low pressure Hg-Ar AC discharge // J. Phys. D: Appl.phys, Vol. 5, 1972, p.562-568