

УДК 537.533

Вакуумное ультрафиолетовое излучение ртутного разряда при давлении буферного газа менее 1 Торр

В. А. Левченко, Л. М. Василяк, С. В. Костюченко, Н. Н. Кудрявцев,
С. А. Свитнев, Е. П. Шаранов

Активное развитие направления фотохимической очистки воздуха за счёт наработки озона и активных радикалов привело к повышенному спросу на мощные и эффективные источники УФ-излучения с длиной волны 185 нм. В настоящее время КПД таких источников невысок, а закономерности генерации ВУФ-излучения газоразрядными лампами низкого давления изучены в недостаточной мере. В данной работе приведены результаты экспериментального исследования потока и КПД генерации излучения на длине волны 185 нм при низких давлениях (0,1—2 Торр) газовой смеси неон-аргон. Показана принципиальная возможность увеличения эффективности генерации ВУФ-излучения существующих газоразрядных ламп низкого давления.

PACS: 52.80.Yr, 52.80.Pi

Ключевые слова: газоразрядная лампа, ртутная плазма низкого давления, инертный газ, вакуумное УФ-излучение.

Введение

Широкое использование ультрафиолетового (УФ) излучения в микроэлектронике, фотохимии, медицине и ряде других областей привело к разработке различных источников УФ-излучения. Амальгамные газоразрядные лампы низкого давления (амальгамные ГРЛНД) имеют высокий КПД (30—45 %) преобразования электрической энергии в УФ-излучение при достаточно высокой погонной мощности разряда 1,5—4 Вт/см [1]. Данные

источники УФ-излучения достаточно экологичны и безопасны, поскольку ртуть в холодной лампе находится в связанном состоянии в виде амальгамы. В виде пара присутствует лишь небольшая её часть при достижении поверхности лампы рабочей температуры 100—130 °С [2]. В спектре излучения ртути присутствуют две резонансных УФ-линии с длинами волн 254 и 185 нм [3]. Излучение с длиной волны 254 нм обладает ярко выраженным бактерицидным эффектом.

Амальгамные ГРЛНД, изготовленные из легированного оксидом титана кварца, пропускающим излучение с длиной волны 254 нм, но поглощающим излучение с длиной волны 185 нм, в основном применяются в задачах, связанных с обеззараживанием (воды, воздуха, поверхностей). В то же время излучение с длиной волны 185 нм активно поглощается в воздухе молекулярным кислородом и парами воды и может быть использовано для генерации озона и высокоактивных радикалов ОН[•]. Сочетание излучения с длинами волн 254 и 185 нм применяется для фотохимической очистки воздуха от вредных веществ и запахов за счет наработки радикалов и фотохимических реакций разложения [1, 4, 5]. КПД генерации УФ-излучения современными амальгамными лампами лежит в диапазоне 30—40 % для резонансной линии 254 нм и 6—9 % для линии 185 нм. Поэтому разработка мощных амальгамных ГРЛНД

Левченко Владимир Александрович, аспирант¹.
Василяк Леонид Михайлович, главный научный сотрудник².
Костюченко Сергей Викторович, председатель совета директоров³.
Кудрявцев Николай Николаевич, ректор¹.
Свитнев Сергей Александрович, ведущий инженер³.
Шаранов Евгений Павлович, студент⁴.

¹ Московский физико-технический институт.
Россия, 141700, г. Долгопрудный, Институтский пер., 9.
E-mail: mscoff@mail.ru

² Объединённый институт высоких температур РАН.
Россия, 125412, Москва, ул. Ижорская, 13, стр. 2.

³ НПО «ЛИТ».

Россия, 107076, Москва, ул. Краснобогатырская, 44, стр. 1.

⁴ Московский энергетический институт.

Россия, 111250, Москва, ул. Красноказарменная, 14.
E-mail: sharanov_evgenii@mail.ru

Статья поступила в редакцию 10 апреля 2016 г.

© Левченко В. А., Василяк Л. М., Костюченко С. В.,
Кудрявцев Н. Н., Свитнев С. А., Шаранов Е. П., 2016

с достаточно высоким КПД генерации излучения с длиной волны 185 нм представляет существенный практический интерес.

При разработке амальгамных ГРЛНД необходимо определить ряд параметров, существенно влияющих на эффективность генерации излучения. В числе этих параметров находятся давление, состав смеси буферных газов и плотность тока разряда. Все эти параметры влияют на температуру электронов в плазме, от которой зависят интенсивность и КПД генерации УФ-излучения плазмы. Электронный уровень атома ртути 6^1P_1 , ответственный за генерацию линии 185 нм, расположен значительно выше уровня 6^3P_1 , с которого излучается линия 254 нм. Следовательно, для повышения эффективности генерации ВУФ-излучения необходимо повышать температуру электронов. Однако одновременно с ростом электронной температуры увеличивается скорость амбиполярной диффузии, потери энергии на ионизацию, потери на стенках и доля энергии, приходящаяся на возбуждение других уровней, электронные переходы с которых не дают вклад в ВУФ-излучение разряда. Поэтому для каждой конкретной геометрии разряда существует оптимальное значение электронной температуры, позволяющее получить максимальное значение КПД генерации излучения. Оптимальное значение КПД генерации излучения с длиной волны 185 нм будет достигаться при более высоких температурах электронов, чем для излучения с длиной волны 254 нм. Добиться увеличения электронной температуры можно как за счет уменьшения давления буферной смеси, так и изменением её состава. В обоих случаях увеличиваются потери электронов на стенках разрядной трубки, что ведёт к увеличению напряженности продольного электрического поля и, как следствие, увеличению электронной температуры. Но при этом увеличиваются потери энергии на стенках.

При разработке источника УФ-излучения существенное значение также имеет не только его КПД, но и поток, генерируемый источником. Известно, что с повышением силы и плотности тока интенсивность излучения растёт до насыщения, обусловленного приближением к равновесию между возбуждающими и тушащими соударениями атомов ртути и электронов. КПД разряда при этом снижается вследствие увеличения потерь на соударения второго рода. Повышение разрядного тока приводит также к увеличению мощности источника, соответственно, к увеличению температуры газа и увеличению давления паров ртути в ртутных лампах, если нет системы стабилизации давления ртути или стабилизированной холодной

точки. Повышение давления паров ртути ведёт к уменьшению напряженности электрического поля и снижению электронной температуры [6, 7]. Одним из преимуществ амальгамных ГРЛНД перед ртутными разрядными лампами является возможность достижения оптимального давления паров ртути в разряде при заранее заданной температуре стенки лампы за счет подбора состава амальгамы.

Интенсивность и КПД генерации УФ-излучения амальгамной ГРЛНД зависят от множества взаимосвязанных параметров [3, 6, 7] и при разработке мощных озоногенерирующих источников излучения необходимо исследовать зависимости интенсивности и КПД генерации ВУФ-излучения от этих параметров. В литературе опубликованы исследования по данной теме [8, 9]. Тем не менее, они в основном выполнены при давлениях буферного газа свыше 1 Торр. В работе [9] приведены зависимости интенсивности и КПД генерации ВУФ-излучения от состава буферной смеси и частоты разрядного тока для давлений 1 Торр и 2 Торр. Более ранняя работа [8] посвящена исследованию зависимостей интенсивности и КПД генерации ВУФ-излучения от величины разрядного тока и давления рабочей смеси. Авторами этой работы были также проведены измерения характеристик разряда при давлении буферного газа менее 1 Торр (для смеси 60Ne/40Ar при давлении 0,5 Торр и величине разрядного тока 1,85 А). Можно отметить, что при этом наблюдалась тенденция к увеличению интенсивности и КПД генерации ВУФ-излучения, однако детальных измерений по широкому числу параметров не производилось.

Следует также отметить, что ресурс оксидных электродов, использующихся в современных газоразрядных лампах, при давлениях рабочей смеси $\sim 0,5$ Торр, как правило, не превышает 3—5 тыс. часов, тогда как к современным ГРЛНД предъявляется требование по рабочему ресурсу на уровне 8—12 тыс. часов [1]. Обеспечивается такой срок службы за счет выбора подходящих оксидных электродов и нанесения особого защитного покрытия на внутреннюю сторону колбы газоразрядной лампы. Помимо продления физического срока службы данное покрытие уменьшает скорость спада интенсивности УФ-излучения, препятствуя инъекции ионов ртути в толщу кварцевых стенок колбы, активно поглощающих резонансное излучение с длинами волн 254 и 185 нм. Для подтверждения эффективности работы защитных покрытий, снижающих скорость спада излучения с длиной волны 254 нм, был проведён ряд исследований [10—14].

Для ВУФ-излучения работы по исследованию полезного срока службы мощных ГРЛНД практически не проводились, однако поскольку ресурс защитных покрытий в настоящее время велик, то можно предположить, что и ресурс ВУФ-ламп будет достаточно велик. По результатам данных исследований [10—14] можно оценить полезный срок службы существующих источников ВУФ-излучения на уровне 3—5 тыс. часов. Следовательно, и срок службы безэлектродных ВУФ-ламп будет определяться свойствами защитных покрытий. В связи с этим, исследования закономерностей генерации ВУФ-излучения при давлениях буферного газа в области 0,1—1 Торр (нижняя граница по давлению взята из предположения, что давление буферного газа должно быть на порядок выше оптимального давления паров ртути в разряде) важны как с точки зрения построения теоретических моделей, так и для разработки источников ВУФ-излучения. Полученные данные можно будет использовать и при разработке безэлектродных ламп [15—17].

В настоящей работе исследована зависимость интенсивности и КПД генерации резонансной линии с длиной волны 185 нм от величины тока разряда, от состава и давления буферного газа в практически неисследованной области давлений менее 1 Торр.

Экспериментальная установка

Для исследований были изготовлены образцы амальгамных ГРЛНД с колбой из минерального кварца с длиной разрядного промежутка 400 мм и внутренним диаметром 16,6 мм. Все лампы прошли стандартную технологическую обработку, включая высокотемпературную обработку в вакууме, и заполнялись смесью спектрально чистых инертных газов. В качестве буферных газов использовались неон и аргон, а также их смеси в отношении 30Ne/70Ar, 60Ne/40Ar и 85Ne/15Ar, давление смеси изменялось в пределах от 0,1 до 2 Торр. Защитное покрытие на внутреннюю поверхность колб ламп не наносилось. В качестве источника паров ртути в лампе использовалась индиевая амальгама, при этом имелась возможность в реальном времени дополнительно подогревать её внешним источником или охлаждать, обдувая вентилятором. Сочетанием подогрева и обдува амальгамы достигалось оптимальное давление паров ртути в лампе (регулируемой температурой амальгамы) для генерации излучения с длиной волны 185 нм. Для контроля повторяемости результатов измерений в каждой группе ламп (по составу буферной смеси) выбиралось одно

давление смеси, при котором изготавливались три идентичных источника, параметры которых измерялись независимо друг от друга. Также для всех ламп, наполненных чистым неоном, либо чистым аргоном, и для части ламп со смесью этих газов были проведены независимые измерения характеристик ламп различными экспериментаторами независимо друг от друга.

Измерения интенсивности излучения с длиной волны 185 нм были выполнены на экспериментальном стенде, собранном на основе вакуумного монохроматора McPherson Model 218, позволяющем измерять спектр излучения лампы в области от 105 нм и выше. Данный монохроматор с одной стороны соединён с герметичной камерой из нержавеющей стали, которая была заполнена азотом во избежание поглощения линии с длиной волны 185 нм, а с другой стороны — с ФЭУ (Hamamatsu R6095) с дополнительной аппаратурой. Сигнал ФЭУ измерялся пикоамперметром Keithley 6485. Показания пикоамперметра были откалиброваны по потоку излучения лампы с теми же геометрическими характеристиками, что и экспериментальные. Более подробно методика измерения оптических характеристик разряда приведена в [8]. Измерение электрических характеристик разряда производилось с помощью измерителя мощности Yokogawa PZ4000. Измерение тока разряда производилось с помощью откалиброванного токового трансформатора; мощность разряда рассчитывалась Yokogawa PZ4000 с учётом форм сигналов и сдвига фаз между током в лампе и напряжением.

В качестве источника тока был выбран специальный электронный пускорегулирующий аппарат (ЭПРА), способный поддерживать в лампе стабилизированный ток силой от 1,6 до 3,2 А (плотность тока разряда в эксперименте составляла от 0,75 до 1,5 А/см²) и частотой ~80 кГц.

Все полученные в настоящей работе экспериментальные данные приведены для длины разрядного промежутка, равной 1 м, поскольку в процессе обработки экспериментальных результатов были учтены потери мощности на электродах лампы, найденные экспериментально перед выполнением основных измерений. Для этого были изготовлены четыре группы ламп, аналогичные экспериментальным и прошедшим ту же технологическую обработку, наполненные аргоном и смесью неоном с аргоном 60Ne/40Ar до давлений 0,3 Торр и 1 Торр, но с разной длиной межэлектродных промежутков (20 см, 40 см и 100 см). Исходя из того, что общая мощность лампы складывается из мощности положительного столба и

мощности, теряемой в приэлектродных слоях, можно провести линейную экстраполяцию мощности лампы до длины разрядного промежутка, равной нулю (по имеющимся данным для реальных длин разрядных промежутков). Тогда это значение даст примерную величину приэлектродных потерь в лампах с одинаковыми конструктивными параметрами (одинаковый состав и давление буферного газа, одинаковый электрод) при заранее заданной величине разрядного тока. Измерения приэлектродных потерь проводились при тех же значениях разрядного тока, для которых впоследствии измерялись электрические и оптические характеристики экспериментальных ламп.

Экспериментальные результаты и их обсуждение

Результаты расчета мощности, теряемой в приэлектродных слоях, полученные по данным измерения мощностей, потребляемых лампами с разной длиной разрядного промежутка, представлены на рис. 1, 2. Было установлено, что в области значений разрядных токов 1,6—3,2 А мощность, теряемая в приэлектродных слоях, в большей степени зависит от величины разрядного тока и давления буферной смеси, чем от её состава, поскольку кривые располагаются на графике (см. рис. 1) группами по давлениям, а не по составу, и падение мощности в приэлектродных слоях существенно возрастает с ростом тока разряда.

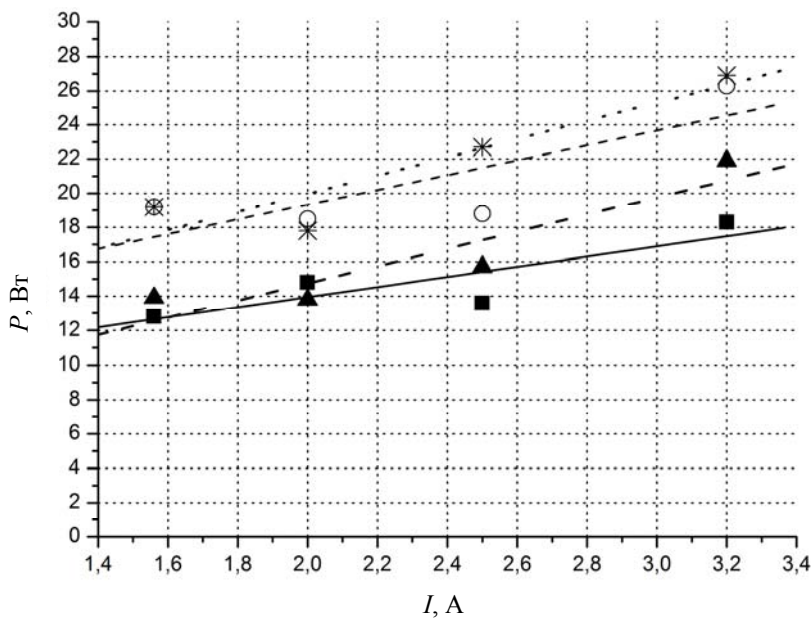


Рис. 1. Зависимости потерь мощности в приэлектродных слоях P от величины разрядного тока I для различного состава и давления буферной смеси. Квадраты и сплошная линия — Ar (100 %, 1 Торр); круги и короткоштриховая линия — Ar (100 %, 0,3 Торр); треугольники и длинноштриховая линия — смесь 60/40 (Ne/Ar, 1 Торр); звёзды и линия из точек — смесь 60/40 (Ne/Ar, 0,3 Торр).

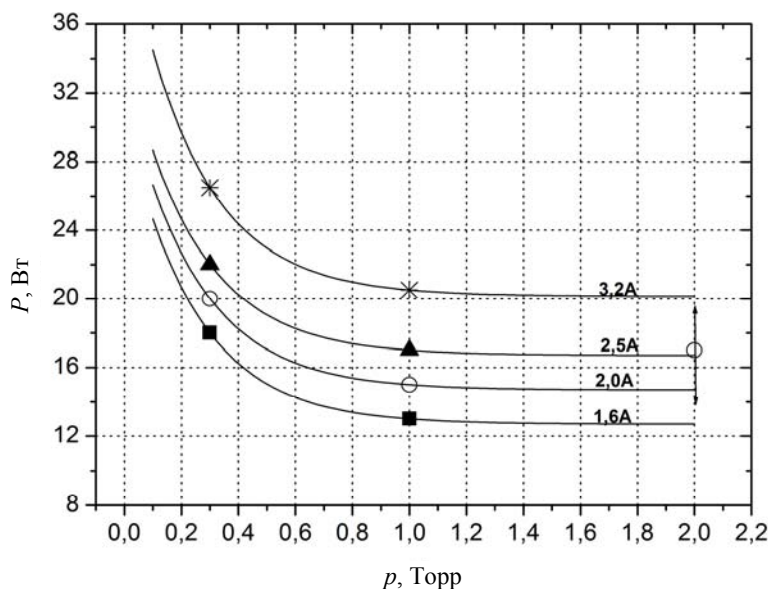


Рис. 2. Обобщённые зависимости потерь мощности в приэлектродных слоях P от давления буферной смеси p для различных значений разрядного тока: квадраты — 1,6 А, круги — 2 А, треугольники — 2,5 А, звёзды — 3,2 А.

Данное обстоятельство дает возможность использовать усреднённое значение падения мощности в приэлектродных слоях при заранее заданном значении разрядного тока и давлении буферной смеси для её различных составов (долей неона и аргона в смеси). На рис. 2 эти значения были нанесены для получения зависимостей падения мощности в приэлектродных слоях от давления буферной смеси при различных значениях величины разрядного тока. На этот график также была нанесена точка, соответствующая падению мощности в приэлектродных слоях при давлении буферной смеси (Ne, 100 %) 2 Торр и величине разрядного тока 2 А, полученная в рамках другого исследования. Было выявлено, что наилучшим образом полученные в эксперименте данные аппроксимируются экспоненциальной зависимостью, поэтому для построения зависимостей падения мощности в приэлектродных слоях от давления буферной смеси для других значений разрядного тока также была выбрана экспоненциальная аппроксимация.

В лампе с аргоном или со смесью с большим его процентным содержанием поток и КПД генерации ВУФ-излучения с длиной волны 185 нм растут с понижением давления буферного газа, как видно из рис. 3 и 4. В частности, из рис. 3 следует, что максимум КПД генерации излучения линии 185 нм (η_{185}) достигается вблизи давления аргона 0,1 Торр. И чем выше разрядный ток, тем при большем давлении аргона расположен максимум в зависимости η_{185} от p_{Ar} . Использование более легкого газа (или смеси с большим содержанием неона) сдвигает максимум η_{185} сторону больших давлений буферной смеси (см. рис. 5 и 6). Ранее экспериментально наблюдался только оптимум для КПД генерации излучения с длиной волны 254 нм при давлении буферных смесей 0,3—0,5 Торр (Ne/Ar — 30/70, 60/40) [18]; наличие оптимума для линии 185 нм подразумевалось, но экспериментально не было подтверждено.

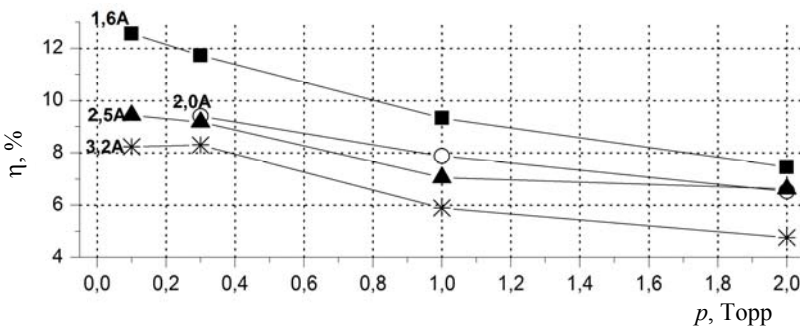


Рис. 3. Зависимость η , т. е. КПД генерации излучения с длиной волны 185 нм от давления p буферного газа (аргон) в оптимуме генерации линии 185 нм. Величина тока разряда: квадраты — 1,6 А, круги — 2 А, треугольники — 2,5 А, звёзды — 3,2 А. Длина разрядного промежутка — 1 м, вычтены потери в приэлектродных слоях.

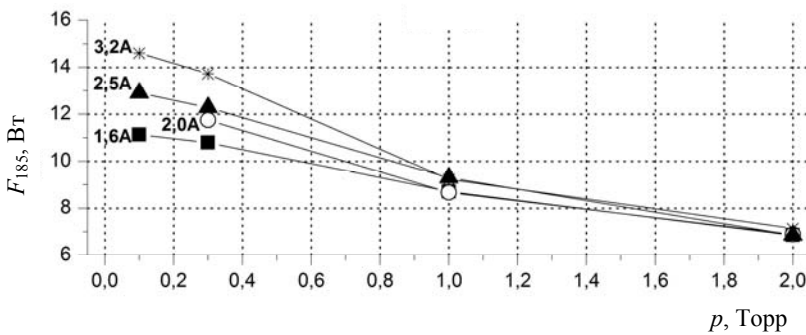


Рис. 4. Зависимость потока F_{185} излучения с длиной волны 185 нм от давления p буферного газа (аргон) в оптимуме генерации линии 185 нм. Величина тока разряда: квадраты — 1,6 А, круги — 2 А, треугольники — 2,5 А, звёзды — 3,2 А. Длина разрядного промежутка — 1 м, вычтены потери в приэлектродных слоях.

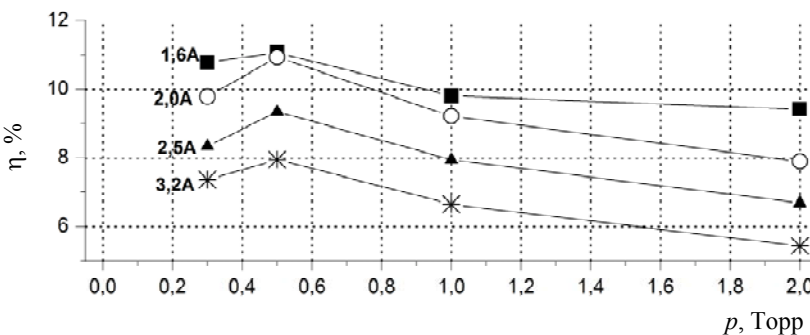


Рис. 5. Зависимость η , т. е. КПД генерации излучения с длиной волны 185 нм от давления p буферного газа (неон — 85 %, аргон — 15 %) в оптимуме генерации линии 185 нм. Величина тока разряда: квадраты — 1,6 А, круги — 2 А, треугольники — 2,5 А, звёзды — 3,2 А. Длина разрядного промежутка — 1 м, вычтены потери в приэлектродных слоях.

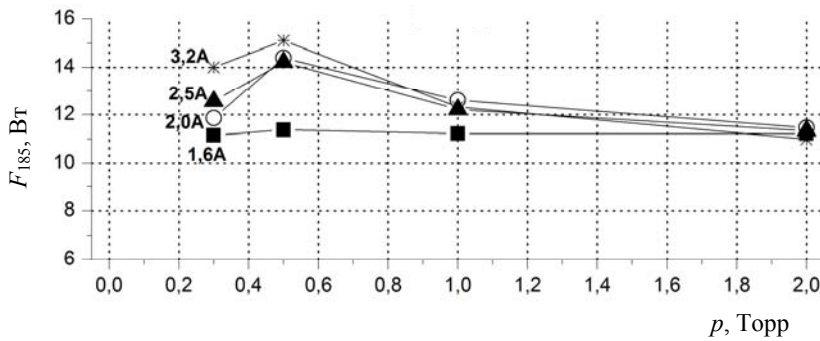


Рис. 6. Зависимость потока F_{185} излучения с длиной волны 185 нм от давления p буферного газа (неон — 85 %, аргон — 15 %) в оптимуме генерации линии 185 нм. Величина тока разряда: квадраты — 1,6 А, треугольники — 2,5 А, звёзды — 3,2 А. Длина разрядного промежутка — 1 м, вычтены потери в приэлектродных слоях.

Следует отметить (см. рис. 4 и 6), что при повышении давления буферной смеси до 1—2 Торр поток излучения с длиной волны 185 нм слабо меняется с ростом тока в диапазоне 1,6—3,2 А (соответствующая плотность тока 0,75—1,5 А/см²). Однако КПД генерации (ВУФ-излучения) в этих точках существенно разнятся (см. рис. 3 и 5). Это означает, что при работе в реальных установках (давления буферной смеси 1—2 Торр являются «рабочими» для этого типа ламп на данный момент) для достижения максимального потока и КПД генерации ВУФ-излучения для наработки озона нет смысла поднимать плотность разрядного тока слишком высоко. Данный факт может позволить упростить источники питания и электродные узлы ламп для наработки озона, а также снизить общее энергопотребление такого рода систем. При переходе к более низким давлениям буферной смеси (ниже 0,5 Торр) более выгодным, с точки зрения получения максимального потока на длине волны 185 нм, является использование высокой плотности тока. Следует отметить, что даже в этом случае КПД генерации ВУФ-излучения остаётся на уровне, достигаемым в современных источниках ВУФ-излучения (не ниже 7—8 %) [8, 19],

но значительно превосходит его (~ в 1,5 раза) при плотности тока разряда 0,75 А/см² и ниже.

При исследовании зависимостей потоков и КПД генерации излучения с длиной 185 нм от состава смеси было получено, что КПД генерации при использовании смесей неона с аргонном в качестве буфера, оказывается практически во всех случаях выше, чем при использовании чистых газов. Более интересным является тот факт, что в области давлений буферной смеси 0,5—2 Торр поток излучения с длиной волны 185 нм растёт с увеличением процентного содержания неона в смеси (рис. 7), тогда как в области давлений 0,1—0,5 Торр появляется максимум, который смещается в сторону большего процентного содержания аргона в буферной смеси при уменьшении её давления (рис. 9). Если рассматривать полученные зависимости с точки зрения достижения максимального КПД генерации ВУФ-излучения (рис. 8 и рис. 10), то наиболее привлекательными являются смеси с процентным содержанием неона в их составе от 30 до 60 процентов. При этом использование смеси 30Ne/70Ar также положительным образом скажется на ресурсе оксидных электродов ламп.

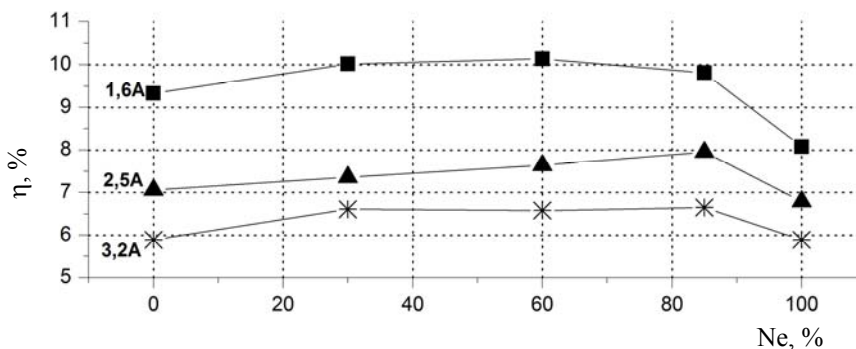


Рис. 7. Зависимость η , т. е. КПД генерации излучения с длиной волны 185 нм от состава смеси Ne/Ar. Давление смеси — 1 Торр. Величина тока разряда: квадраты — 1,6 А, треугольники — 2,5 А, звёзды — 3,2 А. Длина разрядного промежутка — 1 м, вычтены потери в приэлектродных слоях.

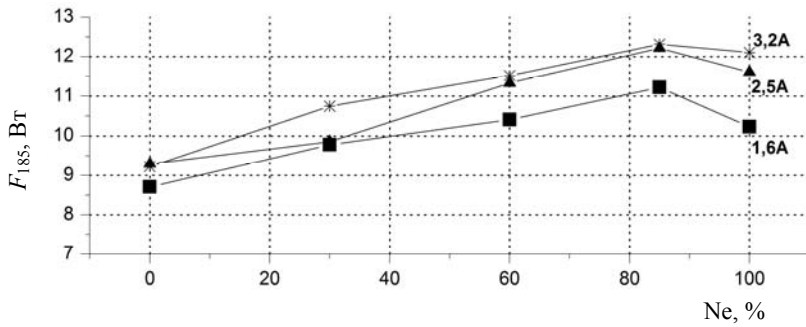


Рис. 8. Зависимость потока F_{185} излучения с длиной волны 185 нм от состава смеси Ne/Ar. Давление смеси — 1 Торр. Величина тока разряда: квадраты — 1,6 А, треугольники — 2,5 А, звезды — 3,2 А. Длина разрядного промежутка — 1 м, вычтены потери в приэлектродных слоях.

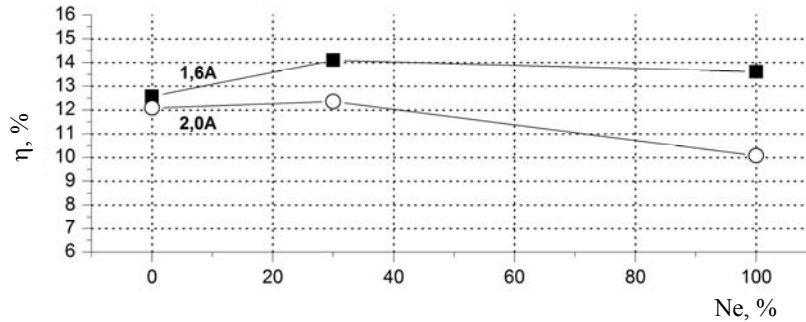


Рис. 9. Зависимость η , т. е. КПД генерации излучения с длиной волны 185 нм от состава смеси Ne/Ar. Давление смеси — 0,1 Торр. Величина тока разряда: квадраты — 1,6 А, круги — 2 А. Длина разрядного промежутка — 1 м, вычтены потери в приэлектродных слоях.

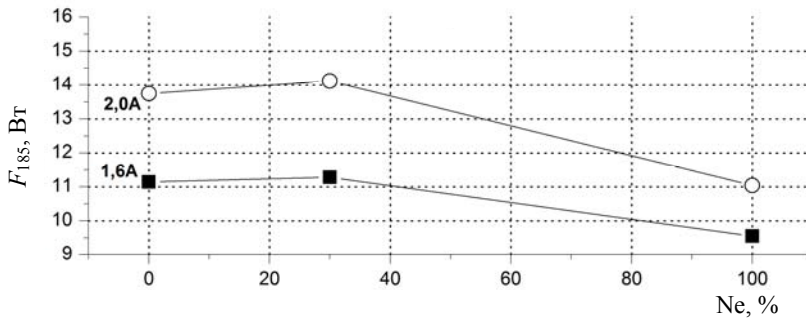


Рис. 10. Зависимость потока F_{185} излучения с длиной волны 185 нм от состава смеси Ne/Ar. Давление смеси — 0,1 Торр. Величина тока разряда: квадраты — 1,6 А, круги — 2 А. Длина разрядного промежутка — 1 м, вычтены потери в приэлектродных слоях.

Максимальное достигнутое значение КПД генерации линии с длиной волны 185 нм составило 14,1 % (при потоке 0,11 Вт/см; смеси 30Ne/70Ar, давлении 0,1 Торр), что практически в 1,5 раза превышает ранее достигнутые значения. Максимальный выход ВУФ-излучения с длиной волны 185 нм составил 0,16 Вт/см при КПД его генерации 9,4 %; смеси 85Ne/15Ar и давлении 0,3 Торр. Данные результаты могут быть улучшены применением синтетического кварцевого стекла для изготовления ламп вместо минерального, поскольку для наших условий отношение потоков при использовании минерального кварца с толщиной стенки 1,2 мм вместо синтетического равно 0,86.

Заключение

В данной работе приведены результаты экспериментального исследования потока и КПД генерации излучения на длине волны 185 нм при низких давлениях (0,1—2 Торр) газовой смеси неон-аргон. Показана принципиальная возможность

увеличения эффективности генерации ВУФ-излучения существующих газоразрядных ламп низкого давления. Основные практические выводы можно сформулировать следующим образом.

1. Величина мощности, теряемой лампой в приэлектродных слоях, в большей степени определяется давлением буферной смеси и величиной тока разряда, а не её составом.

2. Экспериментально подтверждено наличие оптимума генерации излучения с длиной волны 185 нм электрическим разрядом смеси паров ртути и инертных газов.

3. КПД генерации излучения с длиной волны 185 нм выше при использовании в качестве буфера различных смесей неона с аргоном, а не чистых газов; оптимальными являются смеси с содержанием неона от 30 до 60 процентов.

4. Поток излучения и КПД генерации ВУФ на длине волны 185 нм максимальны при давлениях буферного газа в области 0,1—0,6 Торр. Чем тяжелее буферный газ, тем при меньшем его давлении достигается максимум КПД генерации ВУФ-излучения.

5. Реально достижимый КПД генерации излучения ГРЛНД на длине волны 185 нм составляет не менее 14 %, что примерно в 1,5 раза выше, чем в современных источниках такого типа.

6. При давлении буферного газа свыше 1 Торр в реальных источниках нет необходимости использовать высокие плотности разрядного тока, поскольку это приводит только к снижению КПД источника, но не приводит к существенному увеличению потока на длине волны 185 нм. При давлении буферного газа менее 1 Торр для достижения максимума генерируемого потока плотность тока необходимо повышать, но даже в этом случае можно сохранить КПД его генерации на уровне не ниже 7 %. При этом предпочтительно использовать более тяжёлые смеси буферных газов вследствие появления максимума в потоке излучения при давлении смеси менее 0,5 Торр.

ЛИТЕРАТУРА

1. Кармазинов Ф. В., Костюченко С. В., Кудрявцев Н. Н., Храменков С. В. Ультрафиолетовые технологии в современном мире. — Долгопрудный: Издательский дом «Интеллект», 2012.
2. Vasilyak L. M. // Surface Engineering and Applied Electrochemistry. 2009. Vol. 45. No. 1. P. 30.
3. Рохлин Г. Н. Разрядные источники света. — М.: Энергоатомиздат, 1991.
4. Луин В. В., Попович М. П., Ткаченко С. Н. Физическая химия озона. — М.: Издательство МГУ, 1998.
5. Handbook of advanced oxidation photochemical processes. EPA1625/R-981004. 1998.
6. Уэммаус Д. Газоразрядные лампы. — М.: Энергия, 1977.
7. Миленин В. М., Тимофеев Н. А. Плазма газоразрядных источников света низкого давления. — Л.: Изд-во Ленинградского университета, 1991.
8. Василяк Л. М., Дроздов Л. А., Костюченко С. В., Кудрявцев Н. Н., Собур Д. А., Соколов Д. В. // Прикладная физика. 2010. № 6. С. 70.
9. Шунков Ю. Е., Попов О. А., Левченко В. А. // Вестник МЭИ. 2014. № 2. С. 51.
10. Васильев А. И., Василяк Л. М., Костюченко С. В., Кудрявцев Н. Н., Кузьменко М. Е., Печёркин В. Я. // Письма в ЖТФ. 2006. Т. 32. № 1. С. 83.
11. Vasil'ev A. I., Vasilyak L. M., Kostyuchenko S. V., Kudryavtsev N. N., Kuzmenko M. E., Pecherkin V. Ya. // Surface Engineering and Applied Electrochemistry. 2007. Vol. 43. No. 1. P. 49.
12. Василяк Л. М., Васильев А. И., Дроздов Л. А., Костюченко С. В., Кудрявцев Н. Н., Соколов Д. В., Старцев А. Ю. // Прикладная физика. 2009. № 1. С. 120.
13. Василяк Л. М., Дроздов Л. А., Соколов Д. В., Костюченко С. В., Кудрявцев Н. Н. // Светотехника. 2008. № 6. С. 8.
14. Levchenko V. A., Vasilyak L. M., Kostyuchenko S. V., Kudryavtsev N. N., Svitnev S. A., Sokolov D. V., Shunkov Yu. E. // Surface Engineering and Applied Electrochemistry. 2015. Vol. 51. No. 1. P. 54.
15. Piejak R., Godyak V.A., Alexandrovich B. // J. Appl. Phys. 2001. Vol. 89. No. 7. P. 3590.
16. Гвоздев-Карелин С. В. // Светотехника. 2006. № 3. С. 9.
17. Godyak V. A. // J. of Physics D: Applied Physics. 2013. Vol. 46. No. 28. P. 283001.
18. Печёркин В. Я. Автореф. дисс. на соискание уч. ст. к.ф.-м.н. — М., МФТИ. 2007.
19. Шунков Ю. Е. Автореф. дисс. на соискание уч. ст. к.т.н. — М., МЭИ. 2015.

VUV irradiation of a mercury discharge at a buffer gas pressure below 1 Torr

V. A. Levchenko¹, L. M. Vasilyak², S. V. Kostuchenko³, N. N. Kudryavtsev¹,
S. A. Svitnev³, and E. P. Sharanov⁴

¹ Moscow Institute of Physics and Technology
9 Institute al., Dolgoprudny, Moscow Region, 141700, Russia
E-mail: mscoff@mail.ru

² Joint Institute for High Temperatures RAS
Bld. 2, 13 Izhorskaya str., Moscow, 125412, Russia

³ LIT Technology
Bld. 1, 44 Krasnobogatyrskaya str., 107076, Moscow, Russia

⁴ Moscow Power Engineering Institute
14 Krasnokazarmennaya str., Moscow, 111250, Russia
E-mail: sharanov_evgenii@mail.ru

Received April 10, 2016

Very rapid development of photochemical air purification due to the production of ozone and active radicals led to increased demand for powerful and efficient sources of the UV radiation at a wave-

length of 185 nm. Nowadays the efficiency of the VUV sources is not high enough and the principles of the VUV generation by low-pressure discharge lamps are not well understood. This paper presents the results of experimental studies of flow and efficiency of the generation of radiation at a wavelength of 185 nm at low pressures (0.1—2 Torr) of gas mixture (neon and argon). The principal possibility of improving the existing low-pressure discharge lamps designed to generate the VUV radiation is stated.

PACS: 52.80.Yr, 52.80.Pi

Keywords: gas discharge lamp, low pressure mercury plasma, inert gas, vacuum UV irradiation.

REFERENCES

1. F. V. Karmazinov, S. V. Kostyuchenko, N. N. Kudryavtsev, and S. V. Khramenkov, *Ultraviolet Technologies in the Contemporary World*. (Izd. Intellect, Dolgoprudny, 2012) [in Russian].
2. L. M. Vasilyak, *Surface Engineering and Applied Electrochemistry* **45** No.(1), 26 (2009).
3. G. N. Rokhlin, *Discharge Sources of Light*. (Energoatomizdat, Moscow, 1991) [in Russian].
4. V. V. Lunin, M. P. Popovich, and S. N. Tkachenko, *Physical Chemistry of Ozone*. (MGU, Moscow, 1998) [in Russian].
5. *Handbook of Advanced Oxidation Photochemical Processes*. (EPA1625/R-981004. 1998).
6. J. F. Waymouth, *Electric Discharge Lamps*. (MIT Press, Cambridge, 1971; Energiya, Moscow, 1977).
7. V. M. Milenin and N. A. Timofeev *Plasma of Low Pressure Gas Discharge Sources of Light*. (PLSU press, Leningrad, 1991) [in Russian].
8. L. M. Vasilyak, L. A. Drozdov, S. V. Kostyuchenko, D. V. Sokolov, N. N. Kudryavtsev, and D. A. Sobur, *Plasma Physics Reports*. Vol. 37. No. 13. (2011).
9. Yu. E. Shunkov, O. A. Popov, and V. A. Levchenko, *Vestnik MEI*, No. 2, 51 (2014).
10. A. I. Vasil'ev, L. M. Vasilyak, S. V. Kostyuchenko, N. N. Kudryavtsev, M. E. Kuzmenko, and V. Ya. Pecherkin, *Technical Physics Letters* **32** (1), 83 (2006).
11. A. I. Vasil'ev, L. M. Vasilyak, S. V. Kostyuchenko, N. N. Kudryavtsev, M. E. Kuzmenko, and V. Ya. Pecherkin, *Surface Engineering and Applied Electrochemistry* **43** (1), 49 (2007).
12. L. M. Vasilyak, A. I. Vasil'ev, L. A. Drozdov, S. V. Kostyuchenko, D. V. Sokolov, A. Yu. Startsev, and N. N. Kudryavtsev, *Prikl. Fiz.*, No. 1, 120 (2009).
13. L. M. Vasilyak, L. A. Drozdov, D. V. Sokolov, S. V. Kostyuchenko, and N. N. Kudryavtsev, *Svetotekhnika*, No. 6, 8 (2008).
14. V. A. Lecvhenko, L. M. Vasilyak, S. V. Kostyuchenko, N. N. Kudryavtsev, S. A. Svitnev, D. V. Sokolov, and Yu. E. Shunkov, *Surface Engineering and Applied Electrochemistry* **51** (1), 54 (2015).
15. R. Piejak, V. A. Godyak, and B. Alexandrovich, *J. Appl. Phys.* **89**, 3590 (2001).
16. S. V. Gvozdev-Karelin, *Svetotekhnika*, No. 3, 9 (2006).
17. V. A. Godyak, *J. of Physics D: Applied Physics* **46**, 283001 (2013).
18. V. Ya. Pecherkin, PhD synopsis (MIPT, Moscow, 2007).
19. Yu. E. Shunkov, PhD synopsis (MPEI, Moscow, 2015).