

# АМАЛЬГАМНАЯ ЛАМПА ДЛЯ ГЕНЕРАЦИИ ВАКУУМНОГО УЛЬТРАФИОЛЕТОВОГО ИЗЛУЧЕНИЯ (185 нм)

Д. А. Собур

Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет), Москва  
ЗАО «Лаборатория импульсной техники», Москва

## Введение

Источники ультрафиолетового (УФ) излучения применяются для обеззараживания различных сред, в медицине, для обработки поверхностей, для полимеризации лаков и красок, в фотохимии, микроэлектронике, в системах диагностики и множестве других областей. Наибольший интерес представляют ртутные газоразрядные лампы низкого давления, имеющие высокую мощность, высокий КПД преобразования электрической энергии в УФ излучение (35–45 %) и большой ресурс. В таких лампах оптимальное давление паров ртути составляет 5–10 мторр, а давление газовой смеси (как правило, неон-аргон) – несколько торр. Удельная мощность УФ излучения для ртутных ламп составляет 0,2–0,5 Вт/см. В лампах с мощностью УФ излучения более 0,5 Вт/см вместо металлической ртути используют амальгаму, позволяющую поддерживать оптимальное давление паров ртути при высоких температурах, характерных для мощных ламп [1]. В амальгамных лампах низкого давления большая часть ртути находится в связанном состоянии, в виде пара присутствуют только сотые доли мг на лампу [2], когда ее поверхность нагрета до рабочей температуры 100–130 °С. Концентрация паров ртути внутри выключенной лампы при комнатной температуре сравнима с предельно-допустимой концентрацией, поэтому такие лампы представляют значительно меньшую экологическую опасность, чем ртутные. Кроме того, использование амальгамы значительно облегчает проблему утилизации ламп, отработавших свой ресурс. Спектр ртутного разряда содержит две интенсивные резонансные УФ линии 253,65 и 184,95 нм. Вакуумное УФ излучение (ВУФ) с длиной волны меньше 200 нм поглощается в воздухе молекулярным кислородом с образованием озона. Сегодня растет интерес к использованию ВУФ излучения ртутного разряда, особенно в сочетании с излучением резонансной линии 254 нм. В частности, сочетание излучения с длинами волн 254 и 185 нм можно эффективно использовать в задачах фотохимической очистки воздуха от загрязнений [3].

Амальгамные лампы разрабатывались для систем обеззараживания, поэтому была исследована генерация излучения на бактерицидной линии 254 нм, а линия 185 нм в большинстве случаев даже не измерялась, поскольку колба лампы была изготовлена из

специального кварца, который не пропускает эту линию. Целью настоящей работы является исследование генерации линии 185 нм амальгамной лампой в области низких давлений буферного газа.

## Параметры, определяющие выход ВУФ излучения

Интенсивность и КПД генерации ВУФ излучения газового разряда зависят от температуры электронов плазмы разряда  $T_e$ . 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. Для повышения эффективности генерации ВУФ излучения необходимо повышать температуру электронов. Однако, с ростом температуры электронов растут потери на возбуждение более высоких уровней  $6^3D$  и  $7^3S$ , релаксация которых происходит с излучением в видимом диапазоне. Также с ростом температуры электронов растут потери энергии электронов на упругие соударения с атомами инертного газа. Таким образом, существует оптимальное значение температуры электронов, позволяющее получить максимальное значение КПД генерации излучения. Оптимальное значение КПД генерации излучения с длиной волны 185 нм будет достигаться при более высоких температурах электронов, нежели для излучения с длиной волны 254 нм. Температура электронов в ртутной амальгамной лампе низкого давления находится в области 1 эВ и, в свою очередь, определяется рядом параметров лампы.

В ртутных УФ лампах низкого давления в качестве инертного газа обычно используется смесь Ne и Ar. Часто в современной ламповой промышленности используется смесь 60 % Ne/40 % Ar. При давлении газовой смеси ниже 1 торр, КПД генерации излучения линии 254 нм растет с ростом давления. Причиной этого является уменьшение энергетических потерь на ионизацию, а, следовательно, и уменьшение  $T_e$ . Эффективность возбуждения состояния  $6^3P_1$  при этом увеличивается, однако интенсивность излучения при этом уменьшается. С дальнейшим ростом давления в области свыше 1 торр, КПД генерации линии 254 нм начинает падать, поскольку растут потери энергии на упругие столкновения. Выход УФ и ВУФ излучения также зависит от диаметра плаз-

менного столба и концентрации атомов ртути, поскольку для резонансных линий существует эффект «пленения» излучения [4]. При большом диаметре плазменного столба уменьшается  $T_e$ , что приводит к падению КПД, а также уменьшается выход УФ излучения за счет эффекта «пленения». Время жизни возбужденного состояния  $6^3P_1$  много меньше, чем для состояния  $6^1P_1$  [4], поэтому эффект пленения линии 185 нм может оказаться не столь значителен, как для линии 254 нм.

Преимуществом амальгамных ламп является возможность достижения оптимального значения давления ртути в разряде при заранее заданной температуре стенки. Достигается такой эффект оптимизацией состава амальгамы. С ростом силы и плотности тока интенсивность излучения разряда растет до насыщения, обусловленного приближением к равновесию между возбуждающими и тушащими соударениями атомов ртути с электронами. КПД лампы при этом падает за счет роста числа соударений второго рода. Рост ионизации возбужденных атомов с ростом силы тока разряда приводит к падению напряженности электрического поля и  $T_e$ . Повышение давления паров ртути также уменьшает напряженность электрического поля. [4, 5].

Интенсивность и КПД генерации УФ и ВУФ излучения амальгамной лампой низкого давления определяются большим набором взаимосвязанных параметров [4–6]. Экспериментальные исследования ВУФ излучения затруднены по ряду причин. Весельнички И.М. было проведено систематическое исследование зависимости характеристик ртутного разряда от широкого набора параметров [6]. Давление паров ртути поддерживалось во время измерений на заданном уровне путем поддержания требуемой температуры в специальном отростке с ртутью. Вся лампа погружалась в «водяную баню», температура которой поддерживалась на 10 °С выше, чем в отростке. Давление ртути подбиралось соответствующим максимуму излучения линии 254 нм. Исследование проводилось при частоте тока разряда 50 Гц. Погрешности определения светового потока составляли не менее 7–8 %. Условия данных экспериментов значительно отличались от условий эксплуатации современных ламп. Для создания эффективной озонной амальгамной лампы низкого давления, необходимо провести исследования зависимости интенсивности и КПД генерации ВУФ излучения от широкого ряда параметров.

### Экспериментальная установка

Исследования зависимости интенсивности УФ излучения лампы от параметров разряда выполнены с помощью вакуумного монохроматора McPherson Model 218 с решеткой 600 штрихов/мм. Давление в камере монохроматора было менее  $10^{-3}$  торр. Окна монохроматора изготовлены из фторида магния  $MgF_2$ , пропускающего излучение с длинами волн более 105 нм. На выходе монохроматора установлен

фотоэлектронный умножитель (ФЭУ) PMT 658-1 (Hamamatsu R6095). Сигнал ФЭУ измерялся с помощью пикоамперметра KEITHLEY 6485. Экспериментально было определено оптимальное ускоряющее напряжение ФЭУ равное 350 В. Темновой ток ФЭУ при этом составлял менее 0,1 нА. Электрические параметры разряда измерялись с помощью анализатора мощности Yakogawa PZ4000 с погрешностью не более 3 %.

Для обеспечения режима работы лампы, близкого к реальному, была создана экспериментальная камера. Камера представляет собой металлический цилиндр длиной 100 см и диаметром 20 см, вдоль оси которого устанавливалась лампа. Перпендикулярно к оси камеры на середине ее длины был врезан металлический патрубок диаметром 9 см и длиной 20 см, с помощью которого камера присоединялась к входному окну вакуумного монохроматора. Измерение интенсивности излучения производилось поперек разрядной трубки для участка длиной около 1 см. Поскольку при работе ВУФ лампы в воздухе происходит образование озона, то для сохранения теплового баланса лампы и предотвращения образования озона, экспериментальная камера и патрубок заполнялись азотом. Концентрация озона в камере контролировалась с помощью анализатора Циклон 5.51. Рассчитанная систематическая ошибка измерений интенсивности излучения лампы на данном стенде составила около 4 %.

Для экспериментов были изготовлены две серии амальгамных ламп с межэлектродным расстоянием 775 мм. Колбы ламп были изготовлены из специально очищенного кварцевого стекла производства компании Raesch. Внутренний диаметр трубки составлял 16 мм, толщина стенки 1,5 мм, на внутреннюю поверхность трубки было нанесено специальное защитное покрытие из оксида алюминия [7, 8]. Такое покрытие является оптимальным для создания мощных озонных газоразрядных ламп. Коэффициент пропускания колб ламп на длинах волн 185 и 254 нм с нанесенным защитным покрытием был проверен с помощью спектрофотометра Varian Cary 50. Коэффициенты пропускания совпали, относительное отклонение при этом оказалось менее 5 %. В качестве буферного газа использовалась смесь Ne/Ar (60 % / 40 %) при давлениях  $P$  в диапазоне 0,3–2 торр.

В качестве стабилизированных источников тока с частотой 30–70 кГц использовались серийные электронные пускорегулирующие аппараты (ЭПРА) производства Golden Way Corp. (EF23701FL) и АО «ЭНЭФ» (Л~220-1x300-2222-16, Л~220-1x350-2222-18. С использованием данных аппаратов, эффективное значение силы тока можно было задавать в диапазоне 0,44–3,2 А. Погрешность обеспечения требуемой силы тока составляла менее 0,05 А. Напряжение на лампе измерялось с помощью мультиметра UniTrend UT71E. Кроме того, с помощью UT71E измерялась температура стенки колбы лампы. Точность измерения среднеквадратичного напряжения прибором UT71E составляет 0,4 %.

## Результаты экспериментов и обсуждение

Давление паров ртути в разряде определяется температурой амальгамы. В экспериментальных условиях прогрев амальгамы занимает около 15 минут. Поскольку времена релаксации плазмы значительно меньше, то измеряя динамику излучения и напряжения на лампе, мы можем наблюдать зависимость параметров разряда от давления паров ртути (рис. 1). Это в значительной мере упрощает проведение экспериментов по определению оптимального значения давления паров. Давления паров ртути, которые оптимальны для генерации линий 254 и 185 нм в общем случае различаются, хотя и могут принимать близкие значения при определенных параметрах разряда. В данной работе, исследовались параметры, обеспечивающие максимальную интенсивность излучения на длине волны 185 нм ( $I_{185}$ ). Наблюдаемая при измерениях ламп статистическая погрешность вызвана, в первую очередь, точностью определения момента, в который достигается максимальная интенсивность линии 185 нм. Данная погрешность составляет около 5 % для определения интенсивности лампы и около 3 % для напряжения на лампе.

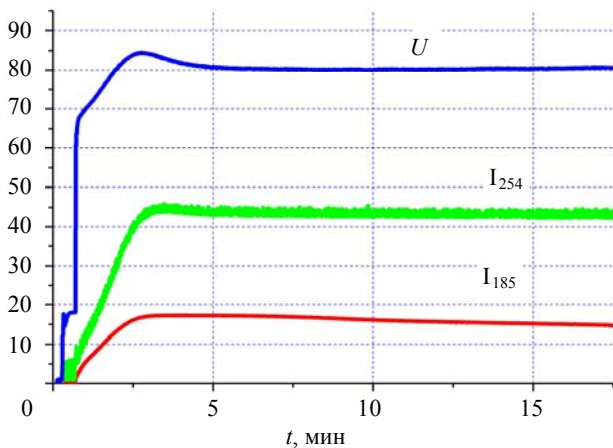
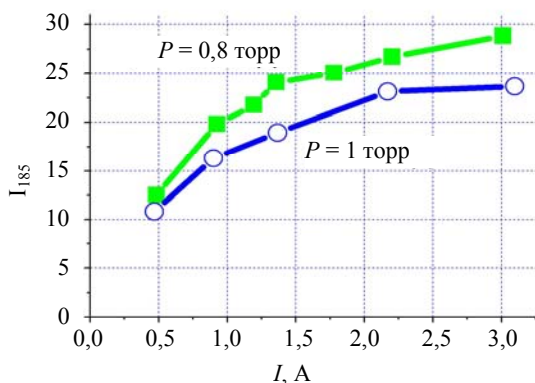


Рис. 1. Зависимость напряжения на лампе  $U$  (В) и интенсивности излучения линий 185 нм  $I_{185}$  и 254 нм  $I_{254}$  (относительных единиц) от времени  $t$  (мин).  $P = 1,2$  торр, сила тока 1,6 А



После включения лампы с ростом температуры стенки лампы растет и концентрация атомов ртути в плазме разряда. При этом интенсивность излучения линий 185 и 254 нм растет, достигая максимума (рис. 1). При дальнейшем росте температуры, в согласии с теорией, интенсивность падает, выходя на некоторое стационарное состояние. Подобный максимум интенсивности в ряде экспериментов не наблюдался. Это связано с тем, что амальгама лампы не содержала достаточно ртути, для достижения оптимального давления паров ртути при полученных температурах стенки лампы (около 150 °С). Надлежащим подбором амальгамы можно добиться того, чтобы давление паров ртути в стационарном режиме оставалось вблизи максимума. Оптимальные давления паров ртути для линий 185 и 254 нм, в общем случае, различаются. В ряде экспериментов они почти совпадали. При других параметрах лампы они значительно различались, причем максимум интенсивности излучения линии 185 нм обычно достигался при меньших давлениях паров ртути. Таким образом, подбирая параметры лампы, можно изменить соотношение интенсивностей линий 185 ( $I_{185}$ ) и 254 нм ( $I_{254}$ ). Поскольку потери на излучение линии 254 нм составляют значительную часть в энергетическом балансе лампы, то рост отношения  $I_{185}/I_{254}$  позволит повысить КПД генерации ВУФ излучения.

На рис. 2 показана зависимость параметров лампы от тока разряда при начальных давлениях буферной смеси  $P = 0,8$  и  $P = 1$  торр. Интенсивность ВУФ излучения  $I_{185}$  при обоих давлениях растет с ростом тока. При давлении 1 торр интенсивность  $I_{185}$  достигает насыщения при токе около 2 А. Для лампы с давлением 0,8 торр насыщение  $I_{185}$  достигнуто не было. Напряжение на лампе  $U$  падает с ростом силы тока за счет роста доли ионизаций возбужденных атомов ртути. КПД генерации ВУФ излучения ( $k_{185}$ ) с ростом силы тока также падает за счет роста числа соударений II рода возбужденных атомов ртути с электронами.

На рис. 3 представлена зависимость интенсивности и КПД генерации ВУФ излучения амальгамной лампой от давления буферного газа при различ-

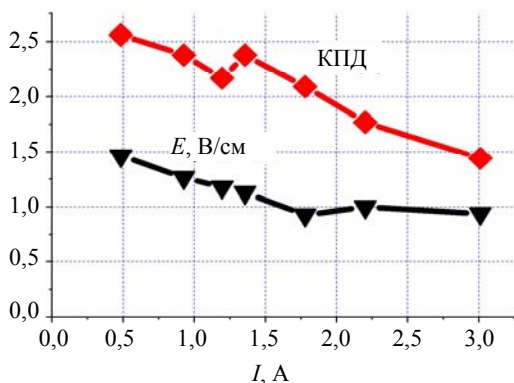


Рис. 2. Зависимость параметров лампы от силы тока разряда  $I$ . Слева: интенсивность  $I_{185}$  (отн. ед.)  $P = 0,8$  торр (квадраты) и 1 торр (окружности). Справа: Напряженность электрического поля (треугольники) и КПД  $k_{185}$  (ромбы) для лампы с давлением 0,8 торр

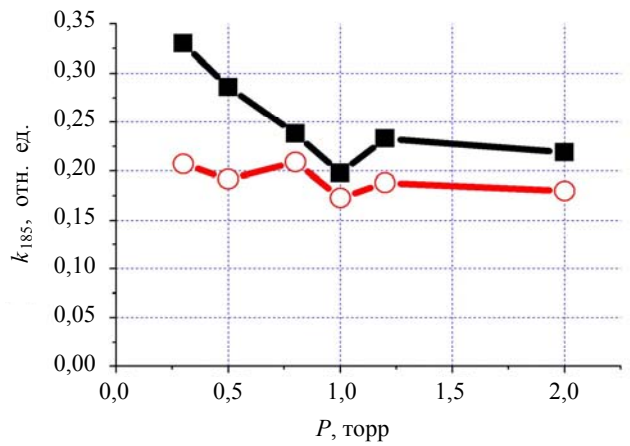
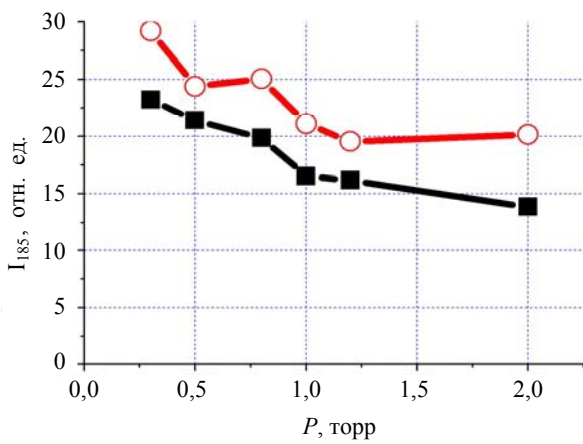


Рис. 3. Зависимость интенсивности  $I_{185}$  (отн. ед.) (слева) и КПД  $k$  (отн. ед.) (справа) генерации излучения 185 нм от давления буферного газа. Сила тока разряда 1 А (квадраты) и 1,85 А (окружности)

ных разрядных токах. В соответствии с теорией понижение давления ниже 1 торр приводит к резкому росту интенсивности излучения. Данный эффект наблюдается как при силе тока разряда 1,85 А, так и при 1 А. КПД генерации ВУФ излучения при этом ведет себя различно. Для разряда с током 1,85 А его значение остается практически постоянным, а при токе 1 А КПД значительно растет в области низких давлений. Таким образом, представляет интерес промышленное изготовление ВУФ ламп с подобными параметрами. Однако, при понижении давления буферного газа значительно возрастает нагрузка на защитное покрытие колбы лампы [1, 7] и, что еще более важно, нагрузка на электроды [9, 10]. Распыление эмитирующего вещества с поверхности электрода приводит к значительному сокращению срока службы лампы. Так, при давлении буферного газа 0,15 торр ресурс работы лампы составил всего несколько часов. Поэтому целесообразно использовать источники с более высоким давлением инертного газа в области 1 торр, хотя это и приводит к уменьшению интенсивности и КПД генерации излучения линии 185 нм.

### Заключение

Исследована зависимость интенсивности и эффективности генерации линии 185 нм от давления инертного газа и силы тока разряда. Интенсивность излучения растет с ростом тока и достигает насыщения при токе около 2 А при давлениях буферного газа 1–2 торр. При давлениях менее 1 торр насыщения не наблюдалось вплоть до тока 3,2 А, однако КПД генерации линии 185 нм при этом уменьшался. Обнаружено, что эффективность генерации линии 185 нм слабо зависит от начального давления буферного газа в диапазоне 1–2 торр. При понижении давления ниже 1 торр интенсивность значительно возрастает. Более того, КПД при этом также растет за счет падения рассеяния энергии электронов на упругие взаимодействия. Однако при низких давлениях буферного газа возрастает нагрузка на защитное по-

крытие колбы лампы. Кроме этого, электроды лампы в таком режиме подвергаются значительной тепловой нагрузке, что приводит к распылению эмитирующего покрытия электрода. При давлении буферного газа 0,15 торр ресурс работы лампы составил всего несколько часов. Поэтому при современном технологическом уровне целесообразно использовать давления буферного газа свыше 1 торр. Путем подбора состава амальгамы можно обеспечить оптимальное давление паров ртути в разряде при различных условиях работы лампы.

### Литература

1. 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. 120–124.
2. Василяк Л. М. Электронная обработка материалов. 2009, № 1. С. 30–40.
3. Лунин В. В., Попович М. П., Ткаченко С. Н. Физическая химия озона. М.: Изд-во МГУ, 1998.
4. Миленин В. М. Тимофеев Н. А. Плазма газоразрядных источников света низкого давления. Л.: 1991.
5. Уэммаус Д. Газоразрядные лампы. М.: Энергия, 1977.
6. Рохлин Г. Н. Разрядные источники света. М.: Энергоатомиздат, 1991.
7. Васильев А. И., Василяк Л. М., Костюченко С. В., Кудрявцев Н. Н., Кузьменко М. Е., Печеркин В. Я. // Письма в ЖТФ. 2006. Т. 32. Вып. 1. С. 83–88.
8. Voronov A. New generation of low pressure mercury lamps for producing ozone // Proceedings of World congress on ozone and UV technologies. LA California USA 2007. С. 2166–2172.
9. Василяк Л. М., Васильев А. И., Костюченко С. В., Соколов Д. В., Старцев А. Ю., Кудрявцев Н. Н. Прикладная физика. 2010, № 3. С. 18–23.
10. Василяк Л. М., Васильев А. И., Дроздов Л. А., Костюченко С. В., Кудрявцев Н. Н., Микаева С. А., Соколов Д. В., Старцев А. Ю. Инженерная физика. 2009, № 1. С. 25–31.