

В.С. Скакун, А.Н. Кривоносенко, М.И. Ломаев, Э.А. Соснин, В.Ф. Тарасенко

Источники мощного УФ-излучения с малой длительностью импульса

Институт сильноточной электроники СО РАН, г. Томск

Поступила в редакцию 4.09.99 г.

Экспериментально исследованы энергетические и временные характеристики излучения плазмы импульсных разрядов короткой длительности. Максимальные импульсные плотности мощности излучения были получены из объемного разряда высокого давления, формируемого в планарной эксилампе с УФ-предыонизацией разрядного промежутка. При давлении смеси несколько атмосфер значения плотности мощности излучения составили на $\lambda \sim 250$ нм 5 кВт/см², на $\lambda \sim 222$ и 308 нм – 3,5 кВт/см². В цилиндрической эксилампе с внутренними электродами на смеси Хе–I₂ была получена импульсная мощность 75 кВт, а в аналогичной КгСl-эксилампе ($\lambda \sim 222$ нм) емкостного разряда – до 2,5 кВт через торец лампы площадью 10 см². Показано, что использование емкостного разряда позволяет увеличить срок службы эксиламп.

В последние годы вырос интерес к созданию ультрафиолетовых ламп, возбуждаемых импульсным разрядом в инертных газах, в галогенах и их смесях [1–5]. Такие источники могут найти широкое применение в различных областях, например в микроэлектронике.

В настоящей статье рассмотрены амплитудно-временные характеристики излучения КгСl-, ХеСl-, КгF- и ХеI-эксиламп, имеющих простую конструкцию, возбуждаемых различными типами импульсного разряда короткой длительности с целью определения условий, при которых достигаются максимальные плотности мощности и импульсные мощности излучения в УФ-области спектра.

1. Экспериментальные установки и методики измерений

В экспериментах были использованы три типа импульсных эксиламп: цилиндрическая лампа тлеющего разряда (первый тип), лампа объемного разряда высокого давления с УФ-предыонизацией разрядного промежутка (второй тип) и безэлектродная лампа, предназначенная для возбуждения емкостным разрядом (третий тип).

Лампы первого типа были изготовлены из цилиндрических кварцевых трубок (с пропусканием в области длин волн 200–300 нм более 80%), на торцах которых устанавливались электроды из никеля или нержавеющей стали, а также фланцы для напуска и откачки газов.

Нами также была использована лампа второго типа, описанная ранее в [1], с возбуждением импульсным самостоятельным разрядом с УФ-предыонизацией. Разряд в ней формировался между сетчатым электродом, имеющим диаметр 8 см, и сплошным электродом, диаметр которого варьировали от 4 до 7 см. Излучение объемного разряда через сетчатый электрод и выходные окна из кварца или СаF₂ диаметром 90–120 мм выводилось наружу. Диаметр светового пучка определяется разме-

ром области, занимаемой объемным разрядом между электродами, а также расстоянием от сетки до экрана, в плоскости которого проводятся измерения. На выходе лампы диаметр пучка составлял примерно 8 см, а потом линейно увеличивался с удалением от выходного окна. Для формирования объемного разряда при повышенных давлениях использовалась предыонизация от искровых промежутков, находящихся равномерно вокруг основных электродов.

В лампе третьего типа, возбуждаемой емкостным разрядом, излучение выводилось через плоское окно из кварца, расположенное на торце трубки. Наружные электроды были изготовлены из алюминиевой фольги, плотно прижатой к поверхности кварцевой трубки. Лампа откачивалась и наполнялась бинарными смесями криптона (ксенона) с Сl₂. Для удобства дальнейшего изложения конструктивные параметры эксиламп, параметры элементов генераторов накачки и состав их газового наполнения собраны в таблице.

Использовались две схемы возбуждения эксиламп. Для возбуждения эксиламп первого и второго типов применялся генератор, состоящий из искрового управляемого разрядника или тиратрона K и накопительного конденсатора C_g , последовательно к ним подключались лампы (рис. 1). В импульсно-периодическом режиме коммутатором служил тиратрон ТГИ1-1000/25. Генератор обеспечивал значения зарядного напряжения U_g до 30 кВ и частоты повторения импульсов до 100 Гц. Лампы третьего типа возбуждали при помощи тиристорно-магнитного генератора, подобного описанному в [6]. Генератор обеспечивал импульсы напряжения амплитудой до 36 кВ и длительностью от 120 нс до 5 мкс. Длительность переднего фронта могла быть различной и в наших экспериментах составляла 3; 0,6; 0,19 и 0,04 мкс. Кроме того, в последнем случае для изменения согласования генератора и лампы третьего типа использовались дополнительные сопротивление R_v , или индуктивность L_v .

Параметры эксиламп и источников питания

Тип лампы	Геометрические размеры разрядной области: диаметр/длина, см	Рабочая смесь, торр	Частота следования импульсов напряжения, Гц/Зарядное напряжение U_g , кВ	C_g , нФ/ R_v , кОм/ L_v , мкГн
Первый	1,5 / 1,5 4,3 / 45	Xe (10) + I ₂ Xe (10) + I ₂	1 – 50 / 15 1 – 50 / 10	9 / – / –
Второй	1,5 – 8 / 1,5 – 2,9	Ne + Kr + HCl Ne + Xe + HCl	до 5 / 32	4,4 / – / –
Третий	3,8 / 3,6	Kr + Cl ₂ Xe + Cl ₂	250 – 1000 / до 36	0,25 / 0,1 – 100 / 0,25 – 40

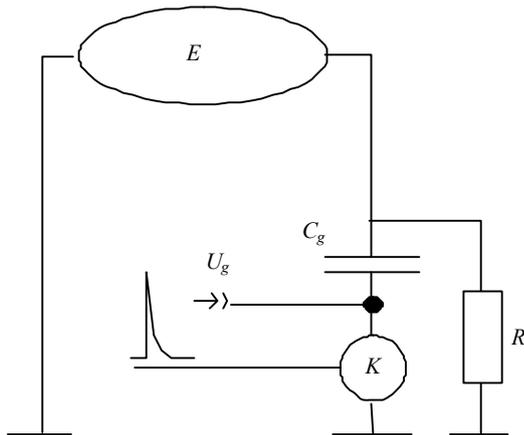


Рис. 1. Схема подключения импульсного источника питания к лампе E : U_g – напряжение от источника питания; K – коммутрующий элемент; C_g – накопительный конденсатор; R_v и L_v – элементы цепи для зарядки C_g и управления длительностью импульса возбуждения

Значения тока и напряжения измеряли омическим шунтом и делителем напряжения, сигналы с которых подавались на двухлучевой осциллограф С8-17. Среднюю и импульсную мощность излучения в заданном интервале длин волн определяли с помощью вакуумного фотодиода ФЭК-22 СПУ с известной спектральной чувствительностью в видимой и ультрафиолетовой областях спектра. Сигнал с ФЭК-22 СПУ подавался на импульсный вольтметр или осциллограф С8-17.

Рабочие смеси готовились непосредственно в лампе при последовательном напуске галогена (Cl₂, HCl), инертного (Xe, Kr) и буферного (Ne, He) газов.

2. Результаты и их обсуждение

Разряд в смесях Xe с парами иода изучался нами ранее в [5]. Спектр излучения в этом случае содержал полосы I₂* и XeI* молекул в области длин волн приблизительно от 250 до 350 нм. Мы исследовали амплитудно-временные характеристики импульсного продольного разряда в цилиндрических эксилампах, разрядные объемы которых существенно отличались друг от друга: 2,6 и 653 см³. В оптимальных с точки зрения получения максимальной эффективности излучения условиях нами были получены импульсные мощности излучения 2,5 и 75 кВт соответственно для ламп первого и второго типов. Энергия в импульсе составляла $0,3 \cdot 10^{-3}$ и $7,5 \cdot 10^{-3}$ Дж, а эффективность $3 \cdot 10^{-2}$ и 3%. Отсюда следует, что эксилампы продольного разряда и малого объема хотя и позволяют получать большую плотность мощности по сравнению с эксилампами

большого объема, но их эффективность оказывается существенно ниже эффективности эксиламп большого объема. Это объясняется тем, что при увеличении мощности накачки эффективность излучения эксиплексных молекул уменьшается и, кроме того, лампы с большими межэлектродными зазорами легче согласовывать с емкостным генератором. Отметим, что в описанных случаях разряд в лампе при увеличении энергоклада и (или) давления начинал контрагировать. В связи с этим представляет интерес получение высокой импульсной мощности в объемном разряде при использовании УФ-предыонизации. Для этого была взята лампа второго типа.

Форма разряда в этой лампе зависела от диаметра сплошного электрода и давления компонентов тройной смеси (в большей степени от давления Xe(Kr) и хлористого водорода и в меньшей – от давления буферного газа Ne). Импульсная мощность излучения росла с увеличением межэлектродного промежутка и диаметра электродов (при неизменных U_g , C_g). Оптимальные смеси с точки зрения выхода излучения соответствовали применяемым в аналогичных XeCl-, KrF- и KrCl-лазерах. При давлении смеси несколько атмосфер значения плотности мощности излучения составили на $\lambda \sim 250$ нм 5 кВт/см², на $\lambda \sim 222$ и 308 нм – 3,5 кВт/см². Контракция разряда (рис. 2) снижала выход ультрафиолетового излучения, и кроме того, со временем приводила к разрушению электродов.

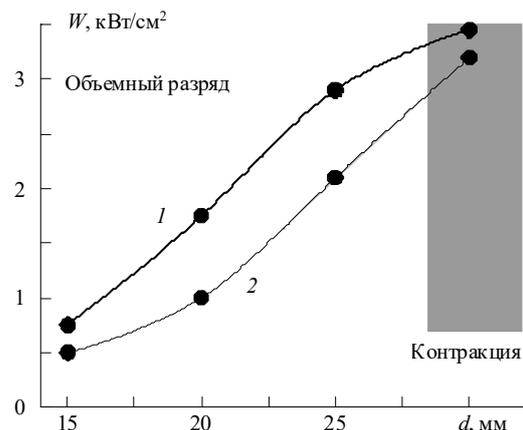


Рис. 2. Зависимость импульсной мощности излучения от межэлектродного расстояния в лампе второго типа с УФ-предыонизацией. Смесь Ne:Kr:HCl = 3 атм:50 торр:3 торр. Диаметр сплошного круглого электрода 40 мм (лампа первого типа) и 75 мм (лампа второго типа). Зарядное напряжение $U_g = 36$ кВ, накопительная емкость $C_g = 4,2$ нФ

Проблему увеличения времени жизни рабочей смеси в лампах с использованием хлора можно решать, применяя для получения импульсного разряда безэлектродные лам-

пы, подобные эксилампе третьего типа. Для испытаний в этом случае нами были взяты бинарные смеси при общих давлениях до 2 торр. Форма импульса излучения эксиламп емкостного разряда сильно зависела от величин сопротивления и индуктивности, устанавливаемых параллельно лампе. Например, мы варьировали величины сопротивления R_v (см. рис. 1) в диапазоне от 100 кОм до 100 Ом. При этом форма импульса излучения трансформируется из традиционной для ламп емкостного разряда многопиковой в однопиковую. Одновременно с этим импульсная мощность излучения уменьшается. Объясняется этот результат тем, что, в частности, при больших R_v возникают колебания напряжения на лампе из-за емкостного характера нагрузки.

В оптимальных с точки зрения максимального светового выхода смесях ($Kr/Cl_2 = 25/1$) и при общем давлении $\sim 0,2$ торр импульсная мощность через торец лампы (площадь торца составляет примерно 10 см^2) составила 2,5 кВт. Если оценить свечение в УФ-диапазоне в угол 4π , считая, что световой поток не ограничен элементами лампы (электродами, рассеянием на местах спаивания кварцевых трубок с плоским торцом), то её значение составит примерно 15 кВт.

Отличительная особенность эксиламп емкостного разряда – длительная работа в квазиотпаянном режиме по сравнению с лампами первого и второго типов. Например, в [3] сообщается, что спустя примерно 10^4 импульсов интенсивность свечения ХеСl-эксилламп упала на треть. Между тем в

наших экспериментах (рис. 3) интенсивность свечения после $\sim 10^6$ импульсов существенно не изменилась.

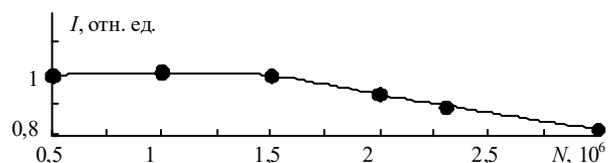


Рис. 3. Зависимость интенсивности свечения ХеСl-эксилламп емкостного разряда от числа импульсов в смеси $Kr:Cl_2 = 25:1$ при общем давлении 2 торр

1. Коваль Б.А., Панченко А.Н., Скакун В.С., Тарасенко В.С., Фомин Е.А., Янкевич Е.Б. Импульсная широкоапертурная лампа. Патент RU № 1792196, приоритет 1990 // Бюлл. изобретений. №23. 1995. С. 35.
2. Василяк Л.М., Костюченко С.В., Красночуб А.В., Кудрявцев Н.Н., Куркин Г.А. // ТВТ. 1995. Т. 33. № 6. С. 826–832.
3. Bollanti S., Clementi G., Di Lazzaro P., Flora F., Giordano G., Letardi T., Muzzi F., Schina G., and Zheng C.E. // IEEE Transactions and Plasma Science. 1999. V. 27. № 1. P. 211–218.
4. Shishatskaya L.P., Yakovlev S.A., and Volkova G.A. // J. Opt. Technol. 1995. V. 62. № 7. P. 477–479.
5. Sosnin E.A., Lomaev M.I., Panchenko A.N., Skakun V.S., Tarasenko V.S. // Proc. SPIE. 1997. V. 3403. P. 308–311.
6. Шубкин Н.Г., Сычев С.П., Визурь В.А. // ПТЭ. 1990. № 3. С. 96–97.

V.S. Skakun, A.N. Krivonosenko, M.I. Lomaev, E.A. Sosnin, V.F. Tarasenko. High-power UV sources with a short pulse duration.

Power and temporal characteristics of radiation of plasma discharge pulses of short duration are investigated experimentally. The maximum radiation pulse power density was received in planar excilamp excited by volume discharge with discharge gap UV-preionization. At mixture pressure of several atmospheres, the radiation pulse power density was 5 kW/cm^2 at $\lambda \sim 250 \text{ nm}$, and $3,5 \text{ kW/cm}^2$ at $\lambda \sim 222$ and 308 nm . In the cylindrical XeI-excilamp with internal electrodes, the radiation pulse power up to 75 kW was obtained. In capacitive discharge cylindrical KrCl-excilamp, at $\lambda \sim 222 \text{ nm}$ the radiation pulse power up to 2,5 kW was obtained. Use of capacitive discharge allows an increase of the excilamp life-time.