

## ЭКСИЛАМПЫ ВАКУУМНОГО УЛЬТРАФИОЛЕТОВОГО ДИАПАЗОНА С ВОЗБУЖДЕНИЕМ БАРЬЕРНЫМ КОРОННЫМ РАЗРЯДОМ

© 2012 г. М. И. Ломаев, доктор физ.-мат. наук; В. С. Скакун, канд. физ.-мат. наук;  
В. Ф. Тарасенко, доктор физ.-мат. наук; Д. В. Шитц, канд. физ.-мат. наук;  
М. В. Ерофеев, канд. физ.-мат. наук

Институт сильноточной электроники СО РАН, г. Томск

E-mail: lomaev@loi.hcei.tsc.ru

Представлены результаты исследований эксилламп с возбуждением барьерным коронным разрядом, для которого характерно неоднородное распределение электрического поля между электродами, один из которых покрыт диэлектриком. Установлено, что при этих условиях возбуждения эффективность излучения на димерах инертных газов достигает 45% на 172 нм и 25% на 146 нм. На основе проведенных исследований созданы: излучательный комплекс отпаянных эксилламп на димерах ксенона с мощностью излучения до 120 Вт и широкоапертурная, малогабаритная эксиллампа с прокачкой аргона в разрядном объеме. Плотность мощности излучения малогабаритной эксилламп в безоконном режиме достигала 10 мВт/см<sup>2</sup>.

*Ключевые слова:* вакуумное ультрафиолетовое излучение, эксиллампа, барьерная корона, однобарьерный разряд.

Коды OCIS: 230.6080; 260.7210

Поступила в редакцию 14.03.2012

### 1. Введение

Одним из наиболее эффективных и доступных способов получения излучения в вакуумной ультрафиолетовой (ВУФ) области спектра является возбуждение инертных газов (He, Ne, Ar, Kr, Xe) или их смесей электрическим разрядом [1–3]. При этом происходит формирование в результате плазмохимических реакций гомо- или гетероядерных димеров в возбужденных состояниях с последующим их радиационным распадом. На практике обычно используют излучение “второго” континуума тяжелых инертных газов: аргона (126 нм), криптона (146 нм), ксенона (172 нм). Это позволяет получать при высоком давлении высокие мощности и эффективности спонтанного излучения. Благодаря наличию высококачественного кварца для изготовления колб с высоким пропусканием излучения 160 нм, как с научной, так и практической точек зрения, наибольшее внимание привлекают ксеноновые эксимерные лампы. В случае криптона и аргона при изготовлении колб применяются более дорогие и менее удобные материалы – кристаллы MgF<sub>2</sub>, CaF<sub>2</sub>, LiF. Кроме того, используют и “безоконный” вариант конструкции эксилламп [4].

Для возбуждения газов используются различные способы, в том числе барьерный и коронный разряды. Как следует из результатов экспериментов [2, 5], эффективность формирования и, соответственно, излучения димеров ксенона определяется, прежде всего, давлением, удельной мощностью возбуждения, а также формой разряда, реализуемой в процессе возбуждения эксилламп. О наибольших эффективностях излучения (до ≈ 60%) сообщалось в [2], где для возбуждения ксенона при давлении ≈ 100 Торр использовался однобарьерный разряд. В [2] было показано, что использование коротких импульсов напряжения позволяет получать диффузный разряд при повышенных давлениях и существенно увеличить эффективность излучения по сравнению с возбуждением импульсами напряжения синусоидальной формы. Аналогичный результат, о преимуществе импульсного напряжения относительно традиционно используемого напряжения синусоидальной формы, был получен и в случае двухбарьерной Хе<sub>2</sub>-эксилламп при давлении до 600 Торр [5]. Результаты моделирования [6] показывают, что давление ксенона ≈ 200 Торр является оптимальным для накачки ксенона наносекундным пучком электронов.

Высокая эффективность излучения димеров ксенона получена и в коронном разряде [7]. Преимуществами при использовании коронного разряда являются, во-первых, возможность использования высокого давления газа, что является одним из условий эффективного формирования димеров инертных газов. Во-вторых, подбором параметров возбуждения можно минимизировать каналы потерь энергии и добиться эффективности излучения относительно энергозатрат в газоразрядную плазму до 55%. Дополнительным преимуществом коронного разряда является и то, что он реализуется при меньших напряжениях по сравнению с барьерным разрядом.

Использование слоя диэлектрика, покрывающего плоский электрод, позволило при синусоидальной форме импульса напряжения получать в различных газах устойчивый барьерный коронный разряд при токах, величины которых существенно превышают токи обычных коронных разрядов в геометрии острие–плоскость [8]. В работе [9] показано, что при возбуждении ксенона, криптона, аргона и неона модулированным ВЧ-разрядом около электрода, выполненного в виде острия, формируется диффузный коронный разряд при давлении 1–2 атм.

Характеристики однобарьерных эксиламп с катодом, имеющим малый радиус кривизны, исследовались в работах [10–14]. Было установлено, что параметры импульса возбуждения влияют на форму разряда и на эффективность излучения димеров ксенона. Было показано, что частота следования импульсов возбуждения может составлять от единиц до сотен килогерц, а оптимальная длительность однополярных импульсов не должна превышать 1–2 микросекунды [11]. Было установлено, что при подаче на электрод с малым радиусом кривизны импульсов напряжения положительной полярности, диффузный разряд начинает контрагироваться [11]. Мощность излучения димеров ксенона в этих условиях существенно уменьшается. В [15] разработан комплекс однобарьерных ксеноновых эксиламп с плотностью и суммарной мощностью излучения  $\approx 15 \text{ мВт/см}^2$  и  $\geq 120 \text{ Вт}$ , соответственно. Излучатели созданных эксиламп использовали в фотореакторе при давлении облучаемого газа более 40 атм.

В настоящей работе приведен краткий обзор исследований и разработок эксиламп при возбуждении ксенона, криптона и аргона в не-

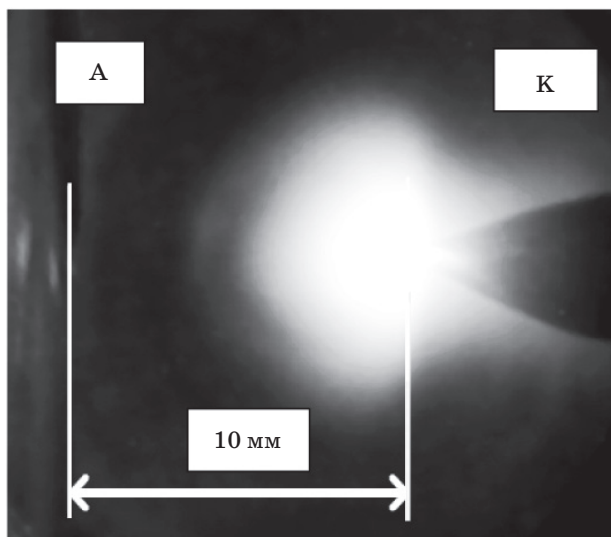
однородном электрическом поле между электродами, один из которых покрыт слоем диэлектрика и выполненных в лаборатории оптических излучений Института сильноточной электроники СО РАН.

Регистрация спектров излучения разряда осуществлялась вакуумным монохроматором VM-502. Определение средней мощности излучения проводилось фотоприемником C8025 Hamamatsu Photonics с головками H8025-126 и H8025-172. В экспериментах регистрировали спектры излучения в диапазоне 120–540 нм при различных давлениях и уровнях мощности возбуждения, осциллограммы тока и напряжения, а также фотографировали свечение разряда.

## 2. Исследование возбуждения инертных газов барьерным коронным разрядом

В работе [7] для возбуждения ксенона использовался коронный разряд постоянного тока. При этом необходимым условием поддержания стабильного коронного разряда является применение в разрядном контуре балластного резистора, что снижает технический КПД устройства практически вдвое. В качестве одного из возможных путей уменьшения энергетических потерь в данных условиях нами [13] было предложено использовать импульсный барьерный коронный разряд, поскольку в этом случае балластный резистор может не использоваться. За счет применения диэлектрического барьера диффузная форма разряда сохранялась в условиях, когда коронный разряд без диэлектрического барьера переходил в искровой. При проведении экспериментов применялась герметичная газоразрядная камера, в которой были установлены на расстоянии 10 мм друг от друга острый катод и заземленный плоский анод, покрытый слоем кварца толщиной 3 мм. Возбуждение газа осуществлялось при подаче на катод импульсного напряжения до 5 кВ. Частота следования однополярных импульсов варьировалась в диапазоне 10–120 кГц. Вводимая в газоразрядную плазму мощность зависела от напряжения и частоты следования импульсов, а также сорта и давления газа, и изменялась в пределах от 10 мВт до 1,3 Вт. Были использованы газы Ar, Kr, Xe при давлении от 15 до 740 Торр.

Особенностью коронного разряда является резкая неоднородность электрического поля в разрядном промежутке, что приводит к яр-



**Рис. 1.** Фотография разряда в ксеноне при давлении 380 Торр и средней мощности возбуждения 120 мВт.

кому свечению газа преимущественно вблизи острейшего электрода (рис. 1). Даже при небольшой разности потенциалов между электродами вблизи острия имеется сильное электрическое поле, которое приводит к возникновению коронного разряда. В этих условиях задержка между импульсами тока и напряжения мала. Это является следствием наличия сильного электрического поля вблизи острия и высокой остаточной проводимости промежутка в течение межимпульсного периода. При мощности возбуждения менее 150–170 мВт вблизи острейшего электрода формируется характерное для коронного разряда шаровидное плазменное образование (рис. 1). Без барьера в этих условиях разряд контрагировался. По мере увеличения мощности возбуждения и давления газа это плазменное образование становится все более вытянутым вплоть до полного перекрытия межэлектродного промежутка. Такая форма разряда обычно реализуется в однобарьерных эксилампах. Подобная тенденция обнаруживается также и с увеличением частоты следования импульсов возбуждения при фиксированных давлении газа и мощности возбуждения.

Для всех исследованных газов в данных условиях в спектре излучения доминируют интенсивные полосы димеров  $Rg_2^*$  в ВУФ области спектра. Наибольшие мощность и эффективность излучения в полный телесный угол достигаются в ксеноне при давлении 380 Торр и составляют, соответственно, 320 мВт и 45%.

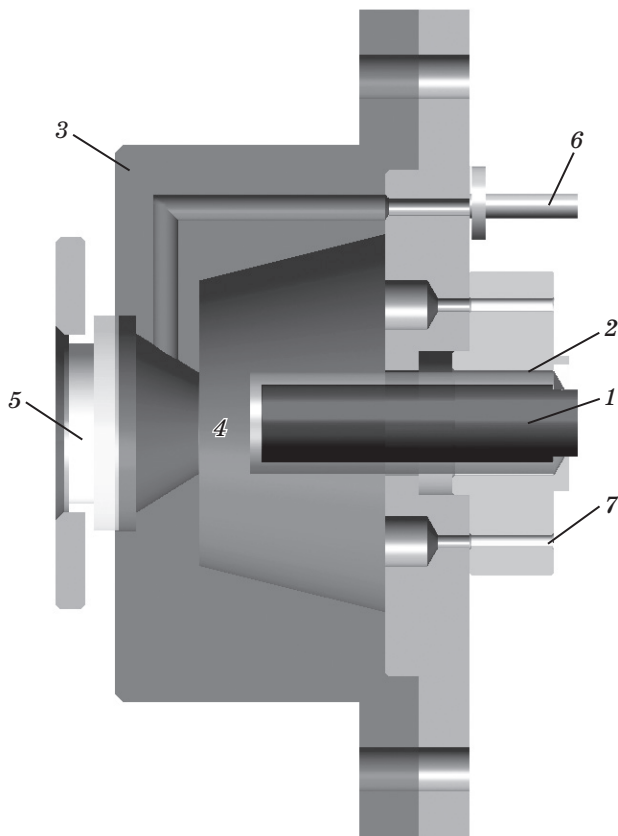
Изменение частоты следования импульсов в диапазоне 15–70 кГц, при неизменном энергокладе за один импульс, практически не изменяет эффективность излучения. В случае криптона наибольшие эффективности излучения достигались при давлении газа  $\approx 1$  атм и составили 25%. Существенно меньшие эффективности излучения были получены для димеров аргона. Одной из наиболее вероятных причин низких интенсивностей излучения в аргоне является наличие примесей в используемом газе.

Приведенные результаты относятся к случаю зажигания одноострийной барьерной короны. При переходе за счет увеличения мощности возбуждения к однобарьерному разряду плазменное образование перекрывало промежутки, а эффективность излучения при повышенных давлениях была максимальной. При дальнейшем увеличении мощности возбуждения наблюдалось контрагирование разряда. Мощность излучения в ВУФ области спектра падала на порядок и более.

### 3. Эксилампы однобарьерного разряда

#### 3.1. Малогабаритная эксилампа на димерах аргона

Эксилампа была разработана для экспериментов в вакуумной камере и должна была работать непрерывно в течение нескольких часов с плотностью мощности не менее 100 мкВт/см<sup>2</sup> при высокой стабильности средней плотности мощности излучения (отклонение не более 5%). Кроме того, диаметр выходного окна эксилампы не должен был превышать 20 мм. Поскольку охлаждение эксилампы при помещении ее в вакуумную камеру затруднено, а также имеются технологические сложности при создании отпаянных образцов эксиламп на димерах аргона, была разработана эксилампа с прокачкой аргона при давлениях выше атмосферного. Конструкция лампы приведена на рис. 2. Лампа состояла из высоковольтного электрода (1), покрытого диэлектрическим барьером, изготовленного из запаянной с торца кварцевой трубки (2) с внешним диаметром 12 мм, помещенного в цилиндрический металлический корпус (3). Разрядный промежуток (4) находился между высоковольтным электродом и острой кромкой заземленного корпуса. Излучение выводилось через окно (5). Формирование диффузного разряда происходило



**Рис. 2.** Конструкция излучателя малогабаритной  $\text{Ar}_2$ -эксилампы. 1 – высоковольтный электрод, 2 – кварцевая трубка, 3 – металлический корпус, 4 – разрядный промежуток, 5 – выходное окно из кристалла LiF, 6 – отверстие для напуска газа, 7 – отверстия для выпуска газа.

как за счет усиления электрического поля на катоде, так и при использовании барьера из кварца. Применение данных конструктивных элементов позволяет увеличивать давление в импульсных эксилампах на димерах инертных газов. Конструкция эксилампы позволяла работать как в безоконном режиме, так и выводить излучение через окно из кристалла LiF (5) диаметром 20 мм. Регулируемая от 0,5 до 10 м<sup>3</sup>/ч подача аргона осуществлялась непосредственно в газоразрядную область через отверстие (6). Для возбуждения лампы на высоковольтный электрод подавались импульсы напряжения положительной полярности длительностью 2 мкс с амплитудой 6 кВ, следующие с частотой от 7 до 70 кГц.

Исследования энергетических характеристик эксилампы показали, что вкладываемая в разряд мощность растет прямо пропорционально с увеличением частоты следования импульсов напряжения. Однако при этом происходит нагрев эксилампы, разряд переходит

из объемной формы в филаментарную с несколькими хаотично движущимися микро-разрядами, что ведет к ухудшению стабильности выхода светового потока, а в дальнейшем к контракции разряда. При низких частотах повторения импульсов напряжения (7–17 кГц) с увеличением вкладываемой мощности происходит увеличение средней мощности излучения. Разряд при этом носит объемный характер. Далее с увеличением вкладываемой мощности объемный разряд стягивается в диффузный канал и мощность излучения падает. При частоте 25 кГц в промежутке формируются несколько диффузных микро-разрядов, что приводит к резкому скачку мощности и эффективности излучения. В диапазоне частот повторения импульсов напряжения 25–70 кГц значения плотности мощности излучения увеличиваются линейно. Однако эффективность излучения димеров аргона падает, что объясняется перегревом рабочего газа и превышением удельной мощности возбуждения ее оптимальной величины. Увеличение скорости потока газа через эксилампу обеспечивает охлаждение и стабилизацию разряда за счет конвективного выноса газа из области разряда. Величина минимального расхода газа для охлаждения разрядного промежутка, обеспечивающего стабильный выход излучения лампы данной конструкции при частоте следования импульсов 7 кГц, составила 0,5 м<sup>3</sup>/ч. При этом плотность мощности излучения на поверхности выходного окна составила не менее 0,1 мВт/см<sup>2</sup> и сохранялась на данном уровне в течение 5 часов непрерывной работы. При частоте повторения импульсов напряжения 70 кГц и увеличении скорости потока газа до 5 м<sup>3</sup>/ч при работе эксилампы в безоконном режиме плотность мощности излучения составила 10 мВт/см<sup>2</sup>, что сопоставимо с параметрами эксиплексных ламп УФ диапазона. Следует отметить, что предлагаемая конструкция излучателя позволяет получать диффузные разряды и других инертных газов, что имеет существенное значение для применения ламп данного типа.

### 3.2. Широкоапертурная эксилампа на димерах аргона

В ряде случаев для практического применения нужны источники излучения большой площади. С этой целью было проведено моделирование зажигания многозазорного барьерного разряда между стальными проволоками

диаметром 1 мм, расположенными над кварцевыми трубками, внутри которых располагались заземленные аноды, плотно прилегающие к внутренней поверхности трубок, или прокачивалась вода. В качестве варьируемых параметров выступали напряжение питания, сорт и давление газа, величина зазора между внешней поверхностью кварцевой трубки и катодом, расстояние между соседними проволоками. Испытания показали, что все импульсные коронные разряды наиболее стабильно зажигаются и имеют примерно равную интенсивность излучения при контакте проволок с поверхностью кварцевых трубок. В результате была разработана безоконная эксилампа, предназначенная для формирования пучка излучения с плоским фронтом [16]. Фотография эксилампы приведена на рис. 3. Особенностью ее конструкции является то, что облучаемые объекты и эксилампа находятся в одной герметичной камере, заполненной рабочим газом. Источники излучения подобной конструкции целесообразно применять для возбуждения димеров аргона ( $\lambda = 126$  нм) и криптона ( $\lambda = 146$  нм), так как излучение с длиной волны короче 150 нм поглощается во многих оптических материалах, в том числе и в высококачественном кварце. В то же время, окна из кристаллов LiF, CaF<sub>2</sub> и MgF<sub>2</sub>, пропускающих излучение с меньшей длиной волны, дороги и обычно имеют малые размеры. Причем, для эксилампы на димерах аргона только кристаллы LiF имеют малое поглощение.

При проведении экспериментов с эксилампой, показанной на рис. 3, в качестве рабо-

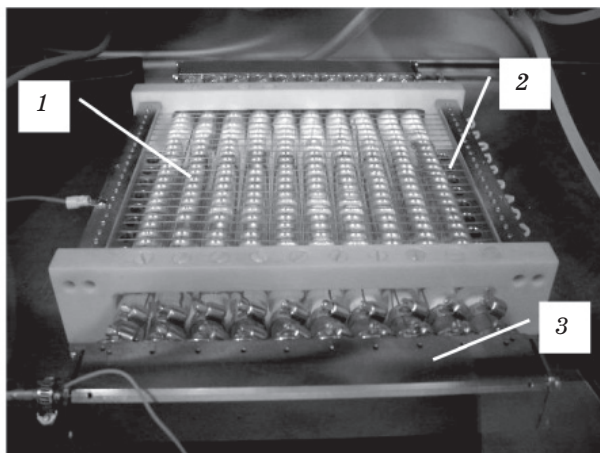


Рис. 3. Фотография эксилампы безоконной конструкции при разряде в аргоне атмосферного давления. 1 – кварцевые трубки, 2 – стальные проволоки, 3 – контур охлаждения.

чего газа использовали аргон, который медленно прокачивался через камеру и при этом очищался от примесей других газов. Средняя мощность излучения на  $\lambda \approx 126$  нм, измеренная на расстоянии 2 см от катода, достигала 1,6 мВт/см<sup>2</sup>. Полная мощность излучения через площадку размером 23×23 см на расстоянии 2 см от катода составила 0,8 Вт. Существенно более высокие средние мощности излучения можно реализовать на этой установке при заполнении камеры криптоном и ксеноном.

### 3.3. Цилиндрические эксилампы с возбуждением однопольным разрядом

При проведении данной части работы было изучено влияние основных факторов, определяющих характер разряда и эффективность излучения эксилампы: давления газа, средней мощности возбуждения, частоты следования, формы, длительности и амплитуды импульсов напряжения, конструкции излучателя. При этом часть из них взаимозависима. Так, величина давления ксенона, при которой достигается максимальная мощность излучения в ВУФ области спектра, зависит от величины напряжения, частоты следования импульсов, длительности и формы импульса напряжения, а также конструкции излучателя. Используемые в эксперименте конструкция эксилампы и схема регистрации разрядных характеристик приведены на рис. 4. Излучатель

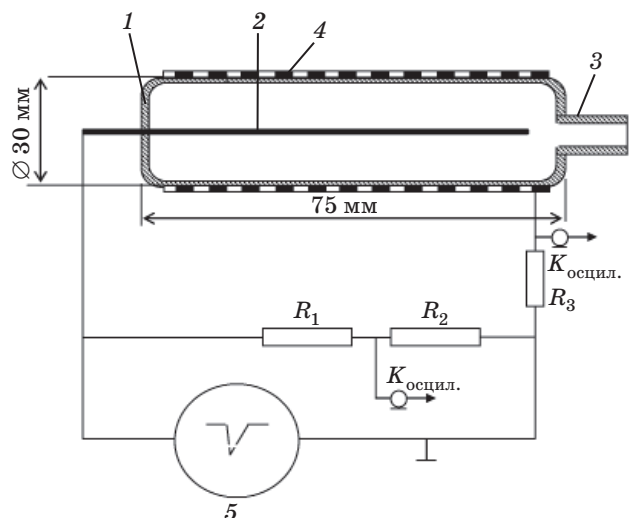


Рис. 4. Схема цилиндрической эксилампы. 1 – кварцевая труба, 2 – потенциальный электрод, 3 – вывод для напуска и откачки газа, 4 – металлическая сетка, 5 – генератор возбуждения. R<sub>1</sub>, R<sub>2</sub>, R<sub>3</sub> – сопротивления делителя напряжения и токового шунта.

состоял из кварцевой трубки длиной 75 мм с толщиной стенки 1 мм и внешним диаметром 30 мм, внутрь которой вставлялся стержень диаметром 0,9 мм из нержавеющей стали. Стержень устанавливался на оси кварцевой трубки и соединялся с высоковольтным выводом, который располагался на одном из торцов трубки. В ряде экспериментов вместо стержня устанавливали спираль диаметром 10 мм и шагом 8 мм или электрод в виде змейки, изготовленный из стальной проволоки диаметром 0,9 мм. Вторым электродом служила сетка с прозрачностью около 90%, установленная на внешней поверхности кварцевой трубки. Излучение димеров ксенона выводилось через боковые стенки трубки, выполненной из кварца типа Suprasil. Пропускание кварца в области 170 нм составляло 70%. Для возбуждения применяли генератор, который формировал импульсы отрицательной полярности с амплитудой до 6 кВ, длительностью 0,3–10 мкс и частотой 10–100 кГц.

Одной из основных особенностей данной конструкции, как и в [2], является катод, имеющий малый радиус кривизны. Это обеспечивает при подаче напряжения усиление напряженности электрического поля вблизи катода. Давление, при котором эффективность излучения димеров ксенона была максимальной, составило 140 Торр. Особенность конструкции – использование катода с малым радиусом кривизны – позволяет формировать объемный разряд при частотах следования импульсов более 10 кГц и давлении более 120 Торр без применения УФ предыонизации. Форма разряда зависела от мощности возбуждения. При мощности возбуждения 3–20 Вт разряд состоял из диффузного облака, охватывающего центральный проводник, или диффузных конусов между центральным катодом и внутренней поверхностью кварцевой колбы. Для данных режимов горения разряда характерна наибольшая эффективность излучения. Режим работы эксилампы при разряде, который состоял из диффузного облака, охватывающего центральный проводник, обычно не используется из-за малой мощности излучения и быстрого перехода в режим разряда с диффузными конусами.

При дальнейшем увеличении мощности возбуждения в газоразрядном объеме наблюдаются диффузные каналы с более ярким свечением в видимой области спектра из прикатодной части каналов. Эффективность излучения эксилампы при этом снижается. Важной особенностью

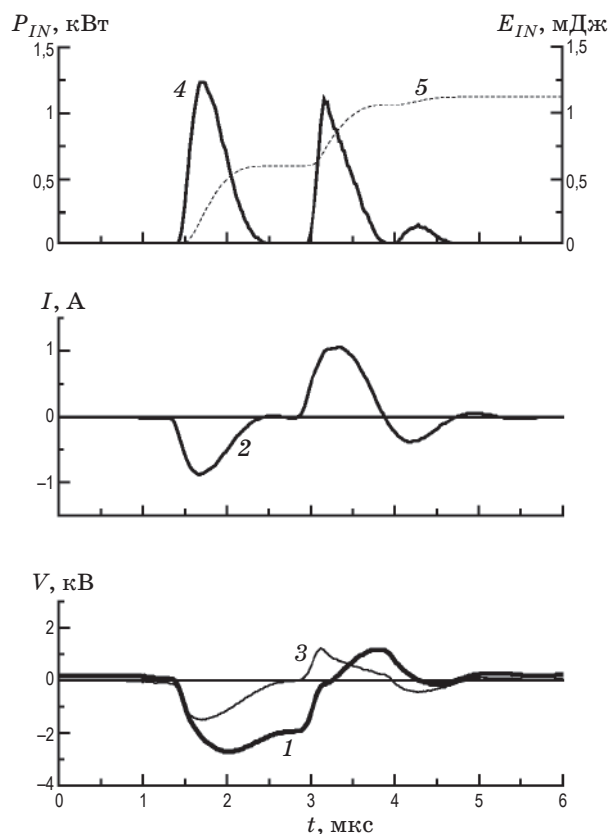


Рис. 5. Осциллограммы импульсов напряжения на электродах лампы (1), тока разряда (2), расчетные кривые падения напряжения на газоразрядном промежутке (3), мощности (4) и энергии возбуждения (5). Частота следования импульсов возбуждения 60 кГц, удельная мощность возбуждения 1 Вт/см<sup>3</sup>.

разряда является то, что из-за использования катода с малым радиусом кривизны и за счет остаточной концентрации электронов не только в период между фронтом и спадом импульса напряжения, но и в межимпульсный период, одновременно с ростом напряжения практически без задержки регистрируется рост тока разряда (рис. 5). Это указывает на заметную проводимость разрядного промежутка к моменту начала подачи импульса напряжения, что отличается от типично наблюдаемой в моноимпульсном режиме задержки роста тока разряда относительно момента подачи импульса напряжения на промежутке.

Одним из преимуществ однобарьерной конструкции относительно двухбарьерной является уменьшение напряжения генераторов, используемых для возбуждения ламп. Анализ экспериментальных данных показывает, что в случае однобарьерных ламп максимумы

как подаваемого, так и напряжения пробоя, оказываются более чем в 1,5 раза меньшими при сопоставимых величинах давления газа и газоразрядного промежутка. Кроме того, в случае однобарьерных ламп оказывается возможным зажигание диффузного разряда вдоль всей рабочей длины лампы при уменьшении мощности возбуждения, что позволяет увеличить эффективность излучения. В то же время, при снижении мощности возбуждения в двухбарьерной лампе количество микро-разрядов уменьшается и разряд формируется лишь в части рабочего объема. Соответственно, удельная мощность в зонах возбуждения уменьшается незначительно. Известно, что данный параметр в значительной степени определяет эффективность излучения лампы. В отличие от однобарьерных, в двухбарьерных лампах при увеличении мощности возбуждения  $\geq 3$  Вт/см<sup>3</sup> характер разряда меняется слабо, что позволяет получать плотности мощности излучения более 100 мВт/см<sup>2</sup> [16].

#### 3.4. О причинах формирования объемного разряда в однобарьерных лампах

Одним из важнейших факторов, влияющих на эффективность и мощность излучения, как указывалось выше, является характер разряда. Моделирование разряда при повышенном давлении ксенона в условиях однобарьерного разряда с катодом в виде стержня с малым радиусом кривизны проводилось А.Н. Ткачевым и С.И. Яковленко [17], а также в наших совместных с ними работах [10, 11] для условий, близких к условиям проведенных экспериментов. Выявлена важная роль прикатодной области в формировании характеристик разряда. Толщина прикатодного слоя при давлении ксенона  $\approx 100$  Торр и напряженности электрического поля 10 кВ/см составляет порядка нескольких десятков микрон, а падение напряжения на нем не более 100 В. В прикатодном слое происходит размножение электронов и экранирование электрического поля зарядами ионов, что может являться причиной ограничения плотности тока через прикатодную область и, соответственно, приводить к стабилизации разряда при флуктуациях плотности тока. Таким образом, слой плотной плазмы вблизи катода выполняет роль плазменного катода. Также можно предположить, что на формирование диффузного разряда влияют убегающие электроны и рентгеновское из-

лучение, которые были зарегистрированы при импульсно-периодическом коронном разряде в воздухе [18].

В [11] была разработана диффузионно-дрейфовая модель развития однобарьерного разряда в ксеноне для вышеописанных условий во всем разрядном промежутке. Процессы образования плазмы описываются уравнениями переноса импульса и уравнениями непрерывности для электронов и ионов, а также уравнением Пуассона

$$\left. \begin{aligned} \vec{j}_e &= N_e \vec{u}_e = \vec{u}_{de}(\vec{E}, N) n_e - D_e(\vec{E}, N) \vec{\nabla}(n_e) \\ \vec{j}_i &= N_i \vec{u}_i = \vec{u}_{di}(\vec{E}, N) N_i - D_i(\vec{E}, N) \vec{\nabla}(N_i) \\ \frac{\partial n_e}{\partial t} + \text{div}(\vec{j}_e) &= \nu_i(\vec{E}, N) n_e - \beta n_e N_i \\ \frac{\partial N_i}{\partial t} + \text{div}(\vec{j}_i) &= \nu_i(\vec{E}, N) n_e - \beta n_e N_i \\ \text{div}(\vec{E}) &= 4\pi e(N_i - n_e) \end{aligned} \right\}. \quad (1)$$

В (1)  $\vec{j}_e, \vec{j}_i$  – плотности электронного и ионного потоков,  $\vec{u}_e, \vec{u}_i$  – средние скорости электронов и ионов;  $\vec{u}_{de}, \vec{u}_{di}$  – средние скорости дрейфа электронов и ионов во внешнем электрическом поле  $\vec{E}$ ;  $D_e, D_i$  – коэффициенты диффузии;  $N_e, N_i$  – плотности электронов и ионов;  $N$  – плотность атомов нейтрального ксенона;  $\nu_i$  – частота ионизации атомов ксенона электронами,  $\beta$  – константа скорости рекомбинации ионов и электронов. В расчете рассматривалась цилиндрическая геометрия колбы лампы. Катод представлял собой цилиндрическую проволочку радиусом, находившуюся под импульсным напряжением с задаваемой временной зависимостью и амплитудой  $U_0 = -(0,5-5)$  кВ. К катоду примыкал заполненный ксенон разрядный промежуток, за которым располагался диэлектрический барьер, отделявший анод от разрядного промежутка.

Моделирование временного развития разряда на основе данной модели позволило выделить три его основных этапа. На первом этапе формируется волна ионизации, направленная к аноду и образуется пик ионной плотности вблизи катода. На втором этапе ионизационная волна достигает барьера и замыкает разрядный промежуток. На третьем этапе происходит накопление электронного заряда на барьере и запираение электронного тока. При снятии внешнего напряжения (на спаде импульса напряжения) накопленный заряд обеспечивает протекание тока в обратном направлении.

#### 4. Заключение

Использование разряда с неоднородным распределением электрического поля между электродами обеспечивает формирование диффузного разряда при повышенном давлении инертных газов и получение на его основе высокой эффективности излучения в ВУФ области спектра. Для возбуждения люминесценции инертных газов предложено использовать импульсный барьерный коронный разряд. Получена эффективность излучения в ксеноне на уровне 45%, в криптоне 25%.

Созданы широкоапертурная безоконная и малогабаритная эксилампы на основе однобарьерного разряда с заменой или прокачкой рабочего газа в разрядном объеме. Получена плотность мощности излучения на длине волны 126 нм до 10 мВт/см<sup>2</sup>. Проведено комплексное исследование зависимости мощности и эффективности излучения, а также характера разряда цилиндрической однобарьерной

ксеноновой эксилампы. На основе экспериментальных и расчетных данных показано влияние остаточной ионизации среды на характер протекания тока разряда. Создан комплекс однобарьерных ксеноновых ламп с выходной мощностью более 120 Вт при плотности мощности излучения  $\approx 15$  мВт/см<sup>2</sup>.

Моделирование развития однобарьерного разряда в ксеноне с катодом малого радиуса кривизны в рамках диффузионно-дрейфовой модели позволило выделить три его основных этапа – формирование волны ионизации, направленной к аноду, достижение волной ионизации барьера и перемыкание разрядного промежутка, и, наконец, накопление электронного заряда на барьере и запираение электронного тока. При моделировании выяснена важная роль размножения электронов и образования плотной плазмы в прикатодном слое, выполняющей роль плазменного катода, способствующего формированию однородного разряда.

\* \* \* \* \*

#### ЛИТЕРАТУРА

1. *Зайдель А.Н., Шрейдер Е.Я.* Спектроскопия вакуумного ультрафиолета. М.: Наука. Гл. ред. физ.-мат. лит.-ры. 1967. 472 с.
2. *Vollkommer F., Hitzschke L.* Dielectric barrier discharge // Proc. of the 8<sup>th</sup> Int. Symp. on Science & Technology of Light Sources, Greifswald, Germany. 1998. P. 51–60.
3. *Герасимов Г.Н.* Оптические спектры бинарных смесей инертных газов // УФН. 2004. Т. 174. № 2. С. 155–175.
4. *Kogelschatz U.* Excimer Lamps: History, Discharge Physics, and industrial Applications // Proc. of SPIE. 2004. V. 5483. P. 272–286.
5. *Mildren R.P., Carman R.J.* Enhanced performance of a dielectric barrier discharge lamp using short-pulsed excitation // J. Phys. D: Appl. Phys. 2001. V. 34. P. L1–L6.
6. *Boichenko A.M., Yakovlenko S.I., Tarasenko V.F.* Electron beam-excited excilamp's optimal characteristics // Laser and Particle Beams. 2000. V. 18. P. 655–660.
7. *Salvermoser M., Murnick D.E.* Efficient, stable, corona discharge 172 nm xenon excimer light source // J. Appl. Phys. 2003. V. 94. № 6. P. 3722–3731.
8. *Акишев Ю.С., Деметьев А.В., Каральник В.Б., Монич А.Е., Трушкин Н.И.* О сходстве и различии барьерной короны переменного тока с положительной и отрицательной коронами постоянного тока и барьерным разрядом // Физика плазмы. 2003. Т. 29. № 1. С. 90–100.
9. *Тарасенко В.Ф., Тоболкин А.С., Башагуров О.Г., Кузнецов А.А., Скакун В.С.* Широкополосное излучение плазмы инертных газов при возбуждении модулированным ВЧ-разрядом // Известия высш. учебн. завед. Физика. 1995. № 10. С. 32–36.
10. *Arnold E., Lomaev M.I., Skakun V.S., Tarasenko V.F., Tkachev A.N., Shitts D.V., Yakovlenko S.I.* Formation of a Volume Discharge in a Xenon Single-Barrier Excilamp with a Low-Curvature Cathode // Laser Physics. 2002. V. 12. № 5. P. 1–7.
11. *Arnold E., Lomaev M.I., Lisenko A.A., Skakun V.S., Tarasenko V.F., Tkachev A.N., Shitts D.V., Yakovlenko S.I.* Volume discharge formation in a one-barrier xenon excimer lamp // Laser Physics. 2004. V. 14. № 6. P. 809–817.



12. Ломаев М.И., Скакун В.С., Тарасенко В.Ф., Шитц Д.В., Лисенко А.А. Безоконная эксилампа вакуумного ультрафиолетового диапазона // Письма в ЖТФ. 2006. Т. 32. В. 13. С. 74–79.
  13. Lisenko A.A., Lomaev M.I., Skakun V.S., Tarasenko V.F. Effective emission of Xe<sub>2</sub> and Kr<sub>2</sub> bounded by a dielectric barrier // Phys. Scr. 2007. V.76. № 2. P. 211–215.
  14. Ломаев М.И., Скакун В.С., Тарасенко В.Ф., Шитц Д.В. Одно- и двухбарьерные эксилампы ВУФ диапазона на димерах ксенона // ЖТФ. 2008. Т. 78. В. 2. С. 103–107.
  15. Шитц Д.В., Скакун В.С., Тарасенко В.Ф. Комплекс эксиламп на димерах ксенона для проточного фото-реактора // Приборы и техника эксперимента. 2008. № 5. С. 129–131.
  16. Lomaev M.I., Lisenko A.A., Skakun V.S., Shitz D.V., Tarasenko V.F., Matsumoto Y. Dielectric Barrier Discharge Excimer Light Source // Japanese Patent № 3887641.
  17. Tkachev A.N., Yakovlenko S.I. Simulation of plasma cathode layer parameters of effective excilamps // Laser Physics. 2002. V. 12. № 7. P. 1022–1028.
  18. Shao T., Tarasenko V.F., Zhang C., Rybka D.V., Kostyrya I.D., Kozyrev A.V., Yan P., Kozhevnikov V.Yu. Runaway electrons and x-rays from a corona discharge in atmospheric pressure air // New Journal of Physics. 2011. V. 13. P. 113305.
-