

А.И. Федоров

Экспериментальные исследования разрядов с автоматической коронной предьонизацией в ХеСl-лазерах

Институт оптики атмосферы СО РАН, г. Томск

Поступила в редакцию 29.09.2000 г.

Представлен обзор результатов экспериментальных исследований объемных разрядов и генерации в ХеСl-лазерах с автоматической коронной предьонизацией. Показано, что для эксимерных лазеров предложенный плазменный электрод с коронным разрядом перспективен при использовании аргоновых смесей. Применение многоконтурных схем питания для самостоятельного разряда является перспективным направлением развития эксимерных лазеров с длинными импульсами генерации.

Введение

Первые электроразрядные эксимерные лазеры работали на молекулах ХеF, КrF и ArF, из которых наиболее эффективной считалась КrF. Авторы [1] показали возможность получения генерации на ХеСl при накачке электрическим разрядом длительностью, не превышающей 20 нс. Такой разряд принято называть быстрым. В работе [2] энергия излучения была значительно увеличена при накачке двойным быстрым поперечным разрядом. В [3–7] были проведены исследования ХеСl-лазера при возбуждении быстрым разрядом с автоматической коронной предьонизацией. Режим быстрой накачки обеспечивался за счет двойного генератора Блюмляйна [5]. Было показано, что ХеСl-лазер по эффективности не уступает ХеF- и КrF-лазерам. Оказалось, что для этого лазера химический состав галогенида (CHCl_3 , CF_2Cl_2 и CCl_4) существенно влиял на энергию и длительность импульсов генерации [7]. Лучшим галогенидом является, по видимому, HCl, так как он не содержит углерод. Авторами работ [8, 9] была получена энергия излучения более 0,1 Дж за импульс с искровой предьонизацией разряда и с галогенидом HCl.

Согласно анализу условий возбуждения эксимерных лазеров, выполненному в обзоре [10], в электроразрядных лазерах с УФ-предьонизацией режим накачки осуществляется быстрым разрядом, который существует в течение не более 35 нс, и соответственно такую же длительность имеют импульсы генерации.

Однако физические свойства лазерных переходов в эксимерных молекулах ХеСl и ХеF позволяли надеяться на получение более длинных импульсов генерации, если соответствующим образом увеличивать длительность импульсов возбуждения. Как известно, свойства лазерных пучков длительностью ~ 1 мкс принципиально отличаются от свойств пучков длительностью ~ 30 нс, так как за время более 0,1 мкс уже формируется модовая структура излучения.

Действительно, в работах [11, 12] при питании от двухконтурного источника с искровой предьонизацией были получены объемные разряды в смесях He:Хе:ССl₄(NF₃) длительностью до 400 нс и в смесях Ar:Хе:ССl₄ – до 200 нс. При этом длительность импульсов генерации на молекулах ХеF и ХеСl возрастала до 130 и 170 нс соответственно. Эти результаты указывали на перспективность исследований, связан-

ных с получением режима накачки разрядов большой длительности, обеспечивающих длинные (~ 1 мкс) импульсы генерации. Для данных разрядов открытыми оставались вопросы выбора типа источника предьонизации, закономерностей развития объемных разрядов высокого давления большой длительности, влияния буферных газов He, Ne и Ar, а также галогенидов как на разряд, так и на кинетику образования рабочих молекул.

В данной статье рассмотрены результаты экспериментальных исследований свойств объемных разрядов с автоматической коронной предьонизацией в ХеСl-лазерах, позволившие сформулировать условия существования режима длинных импульсов накачки. Одним из таких условий является применение многоконтурных источников питания.

1. Результаты экспериментальных исследований объемных самостоятельных разрядов в смесях He(Ar):Хе:ССl₄ с одноконтурными источниками питания

1.1. Экспериментальная установка

Исследования объемных разрядов для газовых смесей He(Ar):Хе:ССl₄, а также (для сопоставления свойств) в газовых смесях, не содержащих галогенидов, были проведены в одноконтурной схеме питания с автоматической коронной предьонизацией и активным объемом $V = D \times H \times L = 1 \times 0,4 \times 4 \text{ см}^3$ (где D – межэлектродный промежуток, H – ширина, L – длина электродов) при давлениях от 0,1 до 4 атм [7, 13].

Электрическая схема установки показана на рис. 1,а. Особенность разрядной кюветы заключалась в том, что использовался катод шириной 2,6 см, а анод был выполнен в виде стержня диаметром 1 см. Такая конфигурация электродов обеспечивала высокую однородность разряда шириной 0,4 см. Установка позволяла снимать интегральную картину свечения разряда как в продольном, так и поперечном сечении разряда. По полученным фотографиям можно судить о пространственной степени однородности разряда в зависимости от газовых компонентов и энергии, вкладываемой в активные среды. Энергия, затрачиваемая на коммутацию и

предыонизацию разряда, не превышала 25% от энергии, запасенной в емкости.

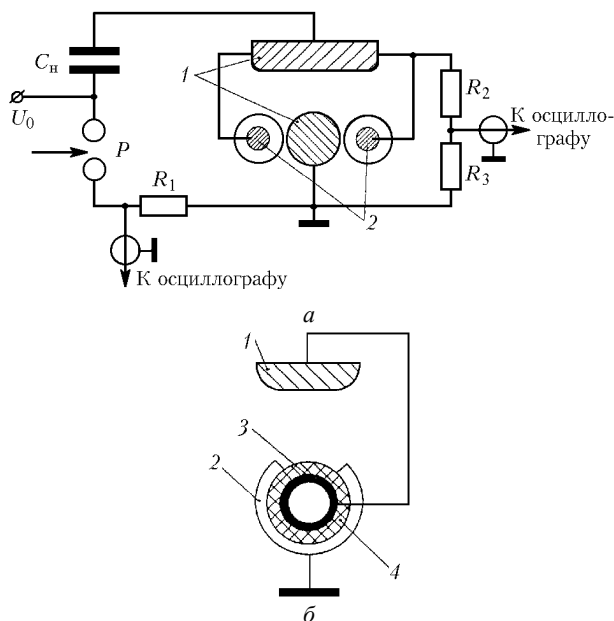


Рис. 1. Электрическая схема установки с УФ-предыонизацией (а) для исследования объемного самостоятельного разряда в газовых смесях He(Ar):Xe:CCl₄; 1 – основные электроды; 2 – вспомогательные электроды; конструктивное исполнение плазменного электрода (б) с коронной предыонизацией: 1 – анод; 2 – катод; 3 – вспомогательный электрод; 4 – кварцевая трубка

1.2. Особенности развития объемного разряда в газах N₂ и He

На осциллограммах напряжения (рис. 2) можно выделить три характерные временные стадии: 1 – участок нарастания напряжения до пробивного; 2 – участок быстрого спада напряжения (характерный для быстрого режима возбуждения азотного лазера); 3 – участок медленного спада напряжения (или квазистационарная стадия разряда). Время существования 1-й стадии равнялось 30 нс и определялось индуктивностью и емкостью разрядного контура, типом и интенсивностью источника предыонизации и свойствами данного газа. Напряжение пробоя оставалось постоянным (~12 кВ) при давлениях более 0,2 атм и зависело лишь от интенсивности источника УФ-предыонизации.

Качественную картину развития объемного разряда повышенного давления в N₂ хорошо иллюстрируют фотографии его интегрального свечения. При давлениях до 0,1 атм наблюдался однородный тлеющий разряд с равномерно распределенными катодными пятнами. При давлениях более 0,2 атм усиливалось одно из катодных пятен. На фронте пятен развивались кистевидные разряды, которые распространялись к аноду. При давлениях более 0,4 атм основное катодное пятно замыкало разрядный промежуток.

Из сопоставления осциллограмм и фотографий следует, что с ростом давления объемная стадия разряда ограничивается развитием катодной неустойчивости за счет снижения E/N почти в два раза (E – напряженность электрического поля, N – концентрация рабочих частиц). Критерием существования объемного разряда в промежутке является наличие на осциллограммах квазистационарной стадии напряжения [14]. Из результатов следует, что объемный разряд в азоте поддерживался до давления 0,3 атм.

Как видно из типичных осциллограмм для гелия (рис. 3), участок нарастания напряжения на промежутке увеличивался до 60 нс. Характерной особенностью разряда в He являлось отсутствие резко выраженной как быстрой, так и квазистационарной стадии напряжения, наблюдаемых ранее для азота. Напряжение пробоя, начиная с давления 1,5 атм и выше, оставалось постоянным (~12 кВ) независимо от давления He и определялось лишь параметрами источника УФ-предыонизации. С увеличением давления однородность разряда улучшалась, что указывало на хорошее согласование импедансов источника питания и плазмы разряда. Согласно осциллограммам напряжения и разрядного тока для давлений выше 2,5 атм почти вся энергия источника питания вкладывалась в газ в первый полупериод разряда.

Качественную картину развития объемного разряда высокого давления в He хорошо иллюстрируют фотографии его интегрального свечения поперек электродов. При давлении ~0,5 атм диффузные катодные пятна развивались на краях электрода (с наибольшим усилением напряженности поля) и замыкались на анод, образуя свободное пространство в центре электрода. При давлении ~1 атм число катодных пятен увеличивалось и их площадь была в 2 раза больше по сравнению с анодными пятнами. Объемный разряд развивался лишь в центральной части электродов. Площади поверхностей свечения катода и анода были соизмеримы, начиная с давления 1,5 атм, и не менялись с ростом давления до 4 атм. Таким образом, для данных экспериментальных условий равномерный объемный разряд в He поддерживался в диапазоне от 1 до 4 атм.

1.3. Особенности объемного разряда в тяжелых инертных газах Ar, Xe и Kr

В продольном сечении электродов (рис. 4) обычный режим разряда (I) в Ar сохранялся до давления 0,3 атм, критерием которого являлись катодные и анодные пятна, равномерно распределенные на электродах. Однако при съемке в поперечном сечении разряда (рис. 4,з) напротив предыонизаторов (см. рис. 1,а) на катоде наблюдались мелкие пятна, обособленные от основного разряда.

При давлениях более 0,3 атм на снимках разряда в поперечном сечении наблюдалось пространственное перераспределение канала разряда – появлялся дополнительный канал разряда между катодом и плазмой на поверхности диэлектрика источника УФ-предыонизации. В данной конфигурации электродов плазма по поверхности диэлектрика является анодом с повышенной напряженностью электрического поля. С появлением дополнительного канала изменялись электрические свойства разряда.

Таким образом, в аргоне при давлении более 0,6 атм разряд прекращался между катодом и анодом и развивался лишь с катода на поверхностную плазму источника УФ-предыонизации (III). На электродах основного промежутка наблюдались мелкие светящиеся пятна. Пока существовал разряд между катодом и анодом, на осциллограммах напряжения сохранялись 3 характерные временные стадии, аналогичные временным стадиям в азоте. Стадия нарастания напряжения в аргоне была в 2 раза меньше, чем для разряда в He, и равнялась 30 нс, т.е. была близка к характерной стадии в азоте. С появлением дополнительного канала на осциллограммах отсутствовала стадия быстрого спада напряжения. Следовательно, в аргоне наблюдались два принципиально разных вида разряда – для низких ($P < 0,3$ атм) и высоких ($P > 0,3$ атм) давлений газа.

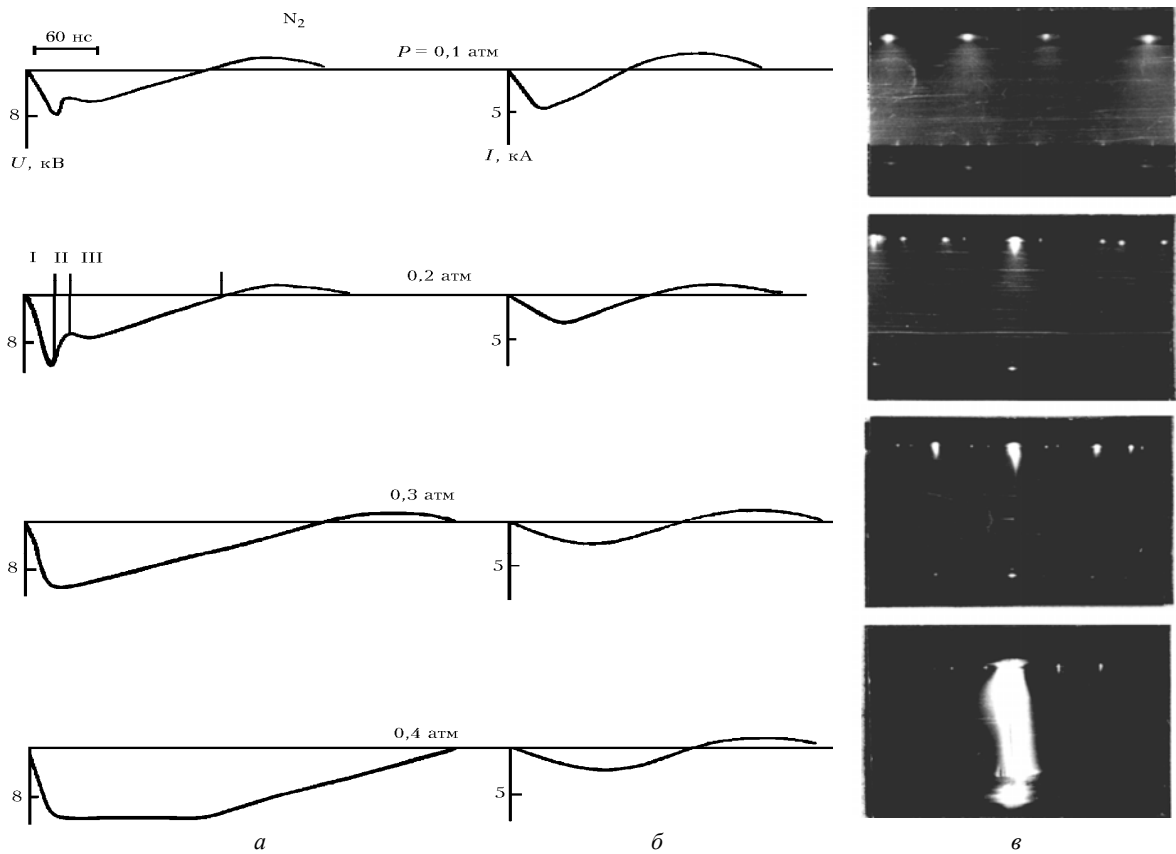


Рис. 2. Типичные для азота осциллограммы напряжения на промежутке (а), разрядного тока (б) и фотографии интегрального свечения разряда вдоль электродов (в) в зависимости от давления при зарядном напряжении $U_0 = 15$ кВ

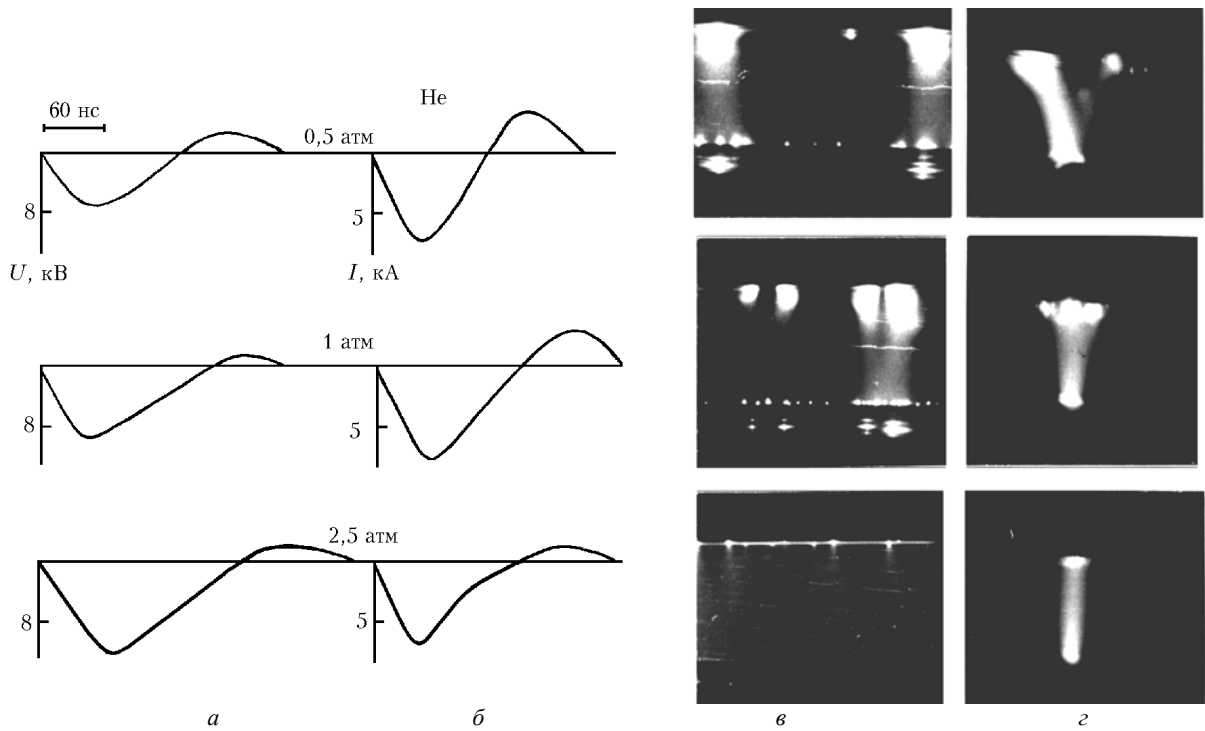


Рис. 3. Типичные для гелия осциллограммы напряжения на промежутке (а), разрядного тока (б), фотографии интегрального свечения разряда вдоль электродов (в) и в поперечном сечении (г) в зависимости от давления при $U_0 = 15$ кВ

Можно предложить следующее объяснение наблюдаемому явлению пространственного перераспределения разряда. При малых давлениях УФ-излучение плазмы, образовавшейся на поверхности диэлектрика, относительно равномерно возбуждает и ионизует газ в промежутке, поэтому разряд развивается между основными электродами. Это обычный разряд. С ростом давления газа длина свободного пробега фотонов уменьшается и электронные лавины преимущественно инициируются в области между

катодом и плазмой на поверхности диэлектрика, являющейся анодом с повышенной напряженностью электрического поля, что приводит к развитию основного разряда в промежутке между катодом и поверхностной плазмой коронного разряда. Это новый тип разряда, так как для его реализации требовалось наличие двух основных и одного вспомогательного электрода, которые обеспечивали условия существования основного разряда в промежутке между основным и вспомогательным (плазменным) электродами.

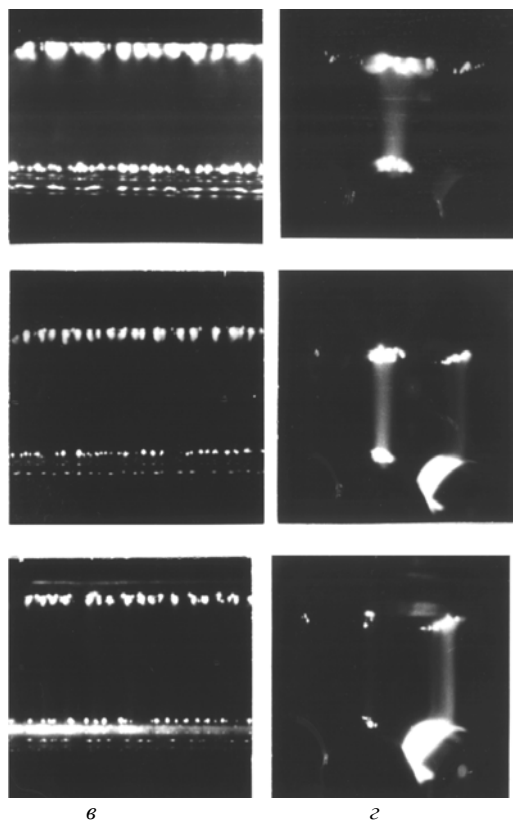
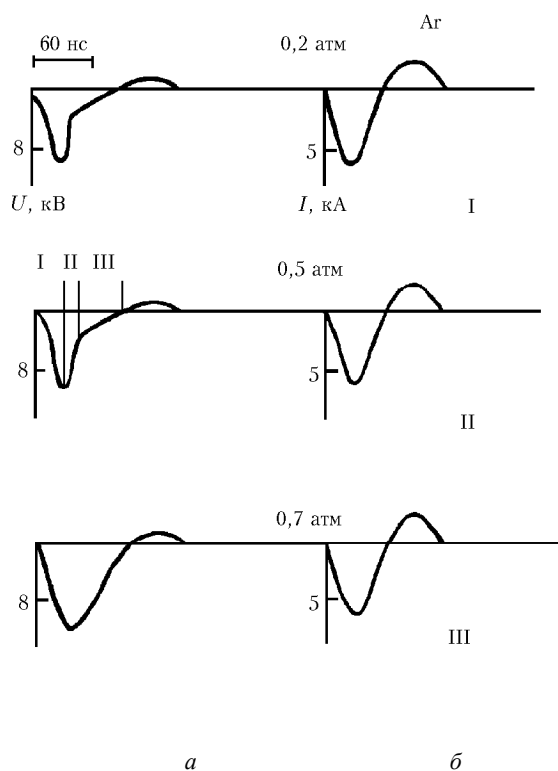


Рис. 4. Типичные для гелия осциллограммы напряжения на промежутке (а), разрядного типа (б), фотографии интегрального свечения разряда вдоль электродов (в) и в поперечном сечении (з) в зависимости от давления при $U_0 = 15$ кВ, где I – III – характерные стадии развития объемного разряда

Таким образом, плазма, создаваемая источником коронного разряда, может служить одним из электродов основного разрядного промежутка. Формирование нового типа разряда обеспечивалось лишь в тяжелых инертных газах Ar, Xe и Kr, что связано с процессами фотовозбуждения и фотоионизации их предварительным коротковолновым излучением плазмы коронного разряда [13, 15]. В частности, объемный разряд в Ar поддерживался до давления 1 атм.

1.4. Разряды в 2- и 3-компонентных смесях с гелием

Аналогичные исследования были выполнены в 2- и 3-компонентных смесях (рис. 5). С ростом давления смеси He:Xe размеры катодных пятен уменьшались, но количество их возрастало. Равномерный объемный разряд наблюдался до давления 4 атм при концентрации Xe не более 5% от суммарного. На осциллограммах напряжения на промежутке наблюдались три временные стадии. Особый интерес представляла квазистационарная стадия напряжения на промежутке для газовых смесей, так как она отсутствовала в чистом гелии.

Катодные пятна в смесях He:CCl₄ были в несколько раз больше, чем в He:Xe. Из них прорастали нитевидные каналы, замыкающиеся на анод. При давлении от 2,5 атм и выше наблюдались несколько основных диффузных каналов и отдельные нитевидные каналы. При этом число нитевидных каналов определялось концентрацией как CCl₄, так и He. Объемный разряд существовал до 1,5 атм при концентрации CCl₄ ≤ 0,1%.

Структура катодных пятен в He:Xe:CCl₄ была аналогична He:Xe. Однако с ростом давления, начиная с 2,5 атм, в промежутке появлялось множество слабопроводящих нитевидных каналов, равномерно распределенных вдоль электродов. Объемный разряд длительностью до 100 нс поддерживался до давления 4 атм при удельных энерговкладах до 200 Дж/(л·атм) для концентраций Xe ≤ 5% и CCl₄ ≤ 0,1%, что подтверждают характеристики разряда, представленные на рис. 6,а. Кроме того, они позволяют утверждать, что в гелиевых смесях однородность и области существования объемного разряда определяются концентрацией буферного газа He и слабо зависят от типа и режима работы источника УФ-предыонизации.

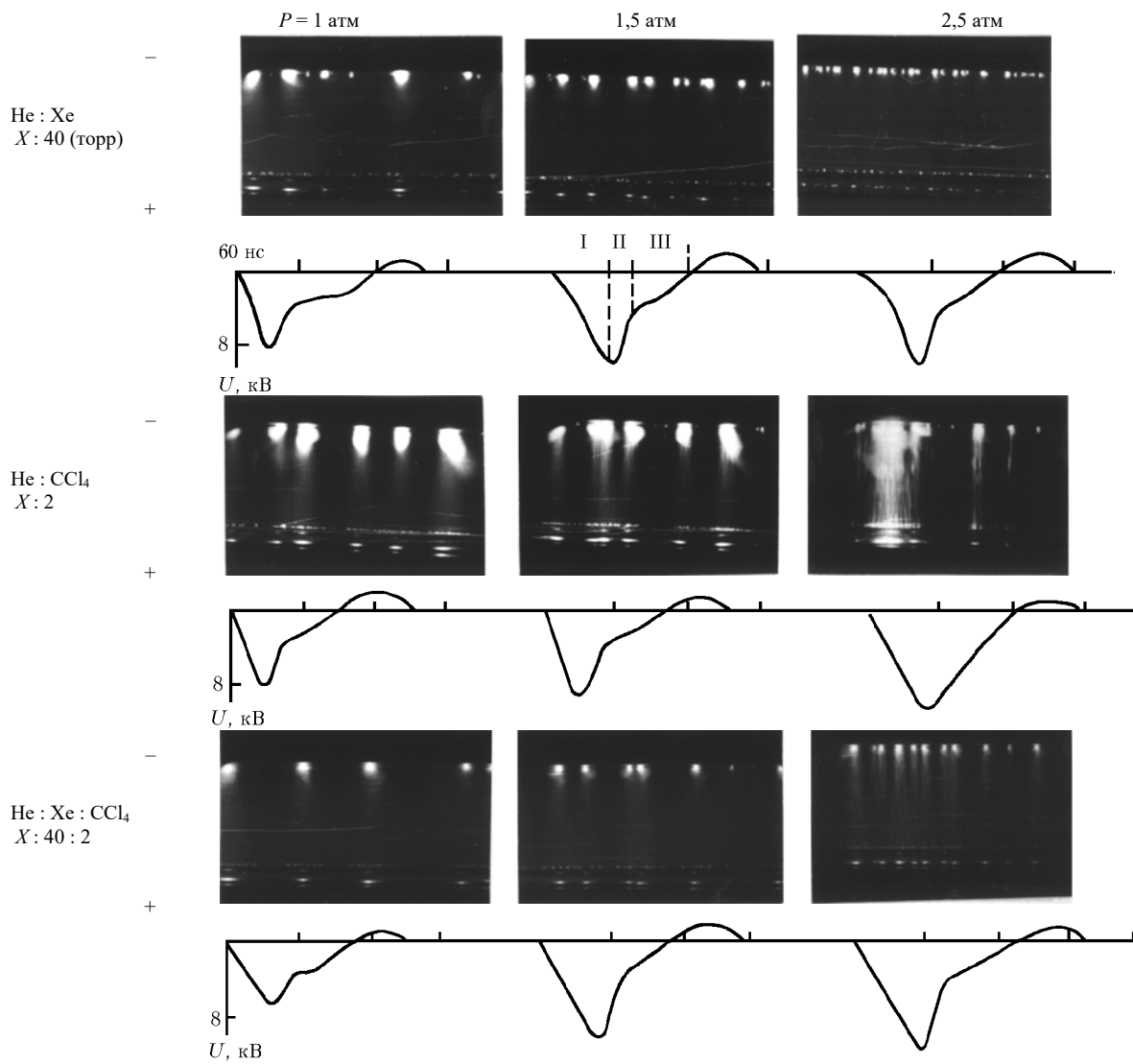


Рис. 5. Типичные для смесей He:Xe, He:CCl₄ и He:Xe:CCl₄ фотографии интегрального свечения самостоятельного разряда в продольном сечении электродов и осциллограммы напряжения на промежутке в зависимости от соотношения и концентрации газовых компонентов при $U_0 = 15$ кВ

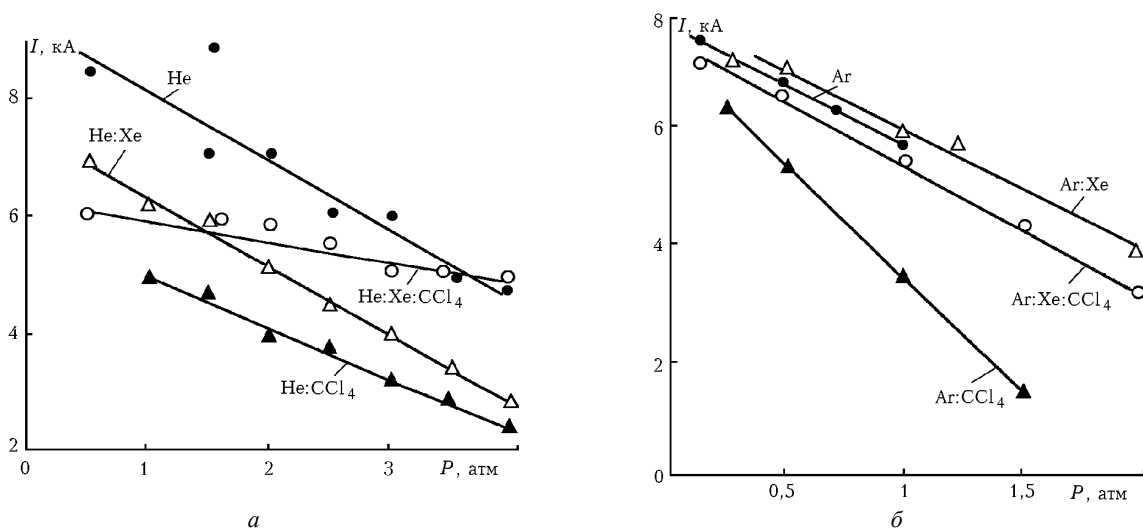


Рис. 6. Зависимости разрядного тока от соотношения и концентрации газовых компонентов в гелиевых (а) и аргонных (б) при $U_0 = 15$ кВ

1.5. Разряды в 2- и 3-компонентных смесях с аргоном

Аналогичные исследования были проведены в 2- и 3-компонентных смесях с буферным газом аргоном (рис. 7). Сопоставляя разряды в чистом аргоне и смесях с аргоном, отметим их следующие отличия.

В разрядах для смесей Ar:Xe наблюдаются пятна двух видов – на катоде и в пространстве, примыкающем

к катоду. Пространственные пятна расположены на расстоянии $2\div 3$ мм от катода. Катодные пятна уменьшались в размере в смесях Ar:Xe по сравнению с Ar и их количество увеличивалось с ростом давления до 1 атм. Пространственные катодные пятна исчезали при давлении более 1 атм, но появлялись диффузные каналы слабой интенсивности, перекрывающие газоразрядный промежуток. Равномерный разряд наблюдался до давления 2 атм.

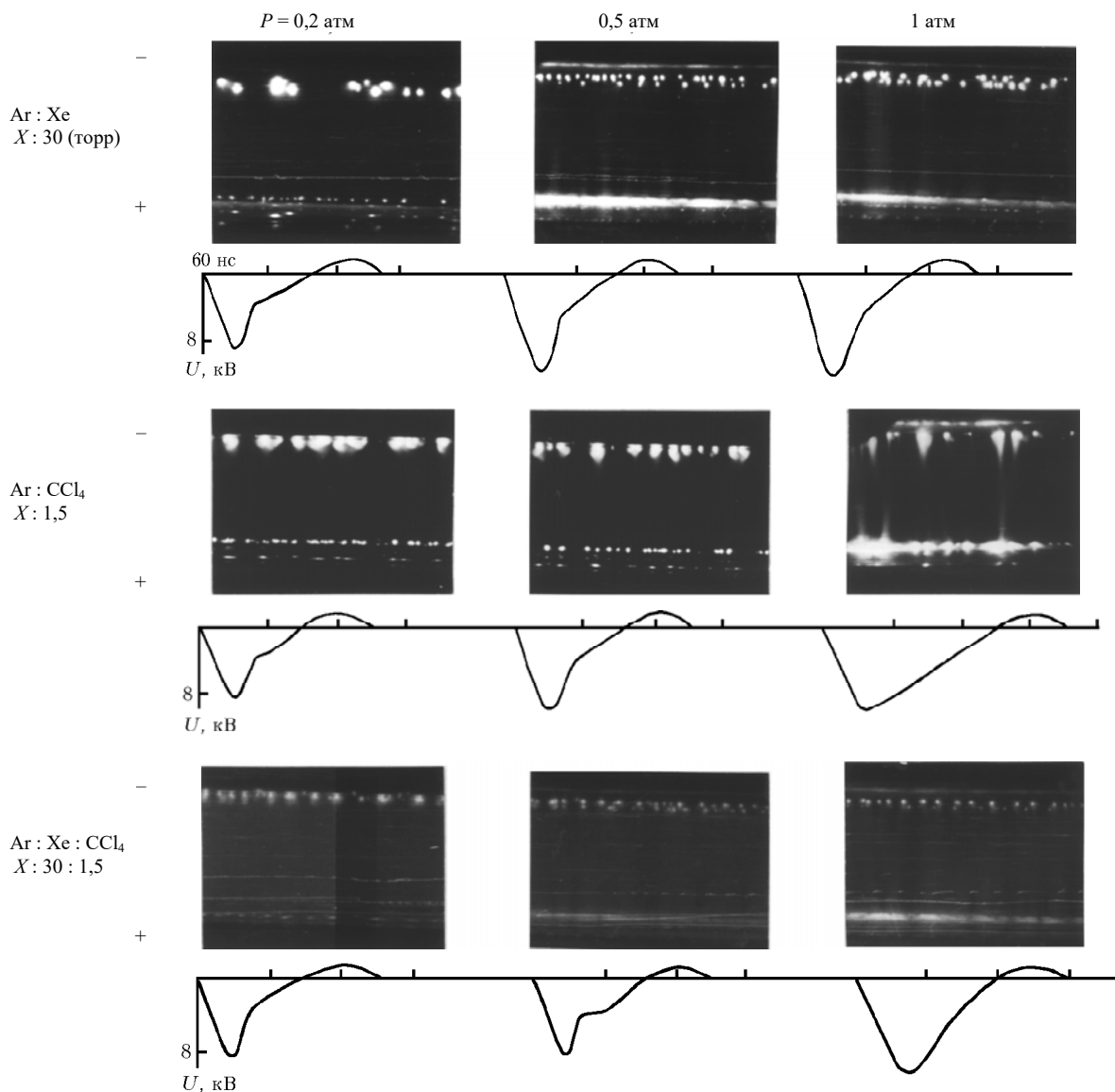


Рис. 7. Типичные для смесей Ar:Xe, Ar:CCl₄ и Ar:Xe:CCl₄ фотографии интегрального свечения самостоятельного разряда в продольном сечении электродов и осциллограммы напряжения на промежутке в зависимости от соотношения и концентрации газовых компонентов при $U_0 = 15$ кВ

Увеличение диапазона давлений устойчивого горения разряда в Ar:Xe по сравнению с Ar обусловлено тем, что Xe играл роль добавки, легко ионизируемой УФ-излучением. Известно, что сечения фотоионизации и фотовозбуждения для Xe больше, чем для Ar, и сдвинуты в длинноволновую область спектра [15]. Экспериментальное подтверждение этого факта можно связать с образованием пространственных катодных пятен и увеличением разрядного тока в Ar:Xe

по сравнению с чистым Ar (рис. 6,б). На осциллограммах напряжения на промежутке наблюдались три характерные временные стадии.

Катодные пятна в смесях Ar:CCl₄ были более крупными и прорастали к аноду через нитевидные каналы. Равномерный разряд наблюдался до давления 0,5 атм при концентрации CCl₄ $\leq 0,1\%$. На осциллограммах напряжения на промежутке также наблюдались три временные стадии.

Катодные пятна в Ar:Xe:CCl₄ были аналогичны пятнам в Ar:Xe, но разряд был более однородным. С ростом давления, начиная с 1 атм, катодные пятна заканчивались равномерными диффузными каналами, соединяющими катод и плазму источника коронной предыонизации, аналогично описанному выше разряду в Ar (см. рис. 4, стадия III). Для смесей Ar:Xe:CCl₄ на осциллограммах напряжения на промежутке наблюдалась квазистационарная стадия разряда. Ее длительность зависела от режима работы коронного источника предыонизации и концентрации газовых компонентов. Равномерный разряд длительностью 100 нс регистрировался до 2 атм при концентрациях Xe ≤ 5% и CCl₄ ≤ 0,1%. В объемной стадии разряда в газ вкладывалась удельная энергия до 300 Дж/(л·атм), что подтверждают характеристики разряда, представленные на рис. 6,б. Кроме того, они позволяют утверждать, что в аргоновых смесях однородность и области существования объемного разряда определяются в основном концентраций газовых компонентов Ar:Xe.

Завершая описание самостоятельных разрядов высокого давления для XeCl-лазера с буферными газами He и Ar при накачке от одноконтурного источника питания с автоматической коронной УФ-предыонизацией, отметим два их свойства: 1) существование квазистационарной стадии напряжения на промежутке независимо от типа буферного газа; 2) формирование нового типа разряда (режим плазменного электрода), характерного для тяжелых инертных газов или аргоновых лазерных смесей.

На основании результатов исследований был разработан плазменный электрод с поверхностным коронным разрядом (см. рис. 1,б). Установлено, что для реализации режима плазменного электрода необходимо наличие: 1) перенапряженного промежутка; 2) автоматического источника коронного разряда, ограниченного диэлектриком и расположенного вблизи одного из электродов; 3) тяжелого инертного газа, обеспечивающего преимущественный процесс объемного фотовозбуждения и фотоионизации активной среды. Была показана высокая эффективность плазменного электрода для эксимерных лазеров [16]. В частности, параметры лазерного излучения для плазменного электрода на молекулах XeF и XeCl с буферным газом Ar были в 1,5–2 раза выше, чем с He [17].

2. Экспериментальные исследования стабилизации разряда в схемах с двухконтурными источниками питания

2.1. Экспериментальная установка

Существование квазистационарной стадии разряда в случае одноконтурных источников питания с автоматическим источником УФ-излучения дает основание считать, что в более сложных схемах питания, например двухконтурных, длительностью квазистационарной стадии разряда и, следовательно, длительностью генерации можно управлять путем вариации схем и параметров элементов контуров питания. Простейшим вариантом 2-контурных источников питания являются схемы, в которых применяется обострительная емкость ($C_{об}$). Ранее в работе [12] была показана возможность получения объемных разрядов большой длительности в XeCl-лазере для 2-контурной схемы питания с автоматической искровой УФ-предыонизацией.

В данной статье проведены аналогичные исследования свойств разряда, энергетических и временных параметров излучения XeCl-лазера с активным объемом $V = 2 \times 0,3 \times 20$ см и рабочей смесью He:Xe:CCl₄ для 2-контурного источника питания с автоматической коронной УФ-предыонизацией [7, 18]. Особенностью схемы питания являлось постоянство величины накопительной емкости (C_n), равной 20 нФ, в то время как обострительная емкость могла изменяться в пределах от 2 до 12 нФ.

Необходимость изменения величины обострительной емкости продиктована тем, что эта емкость может выполнять двойную роль – с одной стороны, уменьшает время нарастания напряжения на электродах лазерного промежутка, с другой – обеспечивает заданную длительность быстрой стадии разряда.

2.2. Свойства разрядов, обеспечиваемые 2-контурными схемами питания

Типичные для смеси (He)Xe:CCl₄ осциллограммы напряжения, разрядного тока и зависимости импульсов и энергии излучения приведены на рис. 8. Эти данные можно обобщить следующим образом.

Увеличение зарядного напряжения при постоянном давлении 2 атм и $C_{об} = 4$ нФ (рис. 8,а) приводило, как и следовало ожидать, к росту амплитуды пробойного напряжения при постоянном времени его нарастания на промежутке. Основное свойство разряда – наличие быстрой стадии разряда. Ее особенность в том, что с ростом зарядного напряжения время спада послепробойного напряжения на промежутке уменьшалось, а амплитуда разрядного тока обострительной емкости возрастала и, соответственно, длительность быстрой стадии разряда уменьшалась. Кроме того, в начале осциллограмм разрядного тока обострительной емкости регистрировалось медленное нарастание тока, соответствующее коронному току предыонизации. Для коронного разряда, в отличие от основного разряда, рост зарядного напряжения не влиял ни на величину амплитуды, ни на длительность тока предыонизации.

Максимальная энергия лазерного излучения регистрировалась при максимальных зарядном напряжении и токе разряда. Длительность импульсов генерации достигала 50 нс. Энергия излучения, реализуемая за первые 20 нс, равнялась энергии, получаемой в течение последующих 30 нс. При этом длительность быстрой стадии разряда не превышала 20 нс. Этот факт указывает на то, что общий ток разряда включает в себя составляющую от разрядного тока накопительной емкости.

Увеличение давления газовой смеси при постоянном зарядном напряжении 20 кВ и $C_{об} = 4$ нФ (рис. 8,б) приводило к росту как постоянной времени нарастания напряжения пробоя на промежутке, так и его амплитуды. Как и следовало ожидать, временное поведение разрядного тока обострительной емкости и импульсов излучения было аналогично случаю, показанному на рис. 8,а, но при оптимальном рабочем давлении смеси. Величина оптимального давления смеси связана с параметрами источника автоматической УФ-предыонизации. Следовательно, 2-контурная схема питания с $C_{об} = 4$ нФ и $C_n = 20$ нФ позволяла, с одной стороны, обеспечивать оптимальное возбуждение газовой смеси за счет оптимального E/N , а с другой – увеличивать скорость ввода энергии в активную среду за счет быстрой стадии разряда.

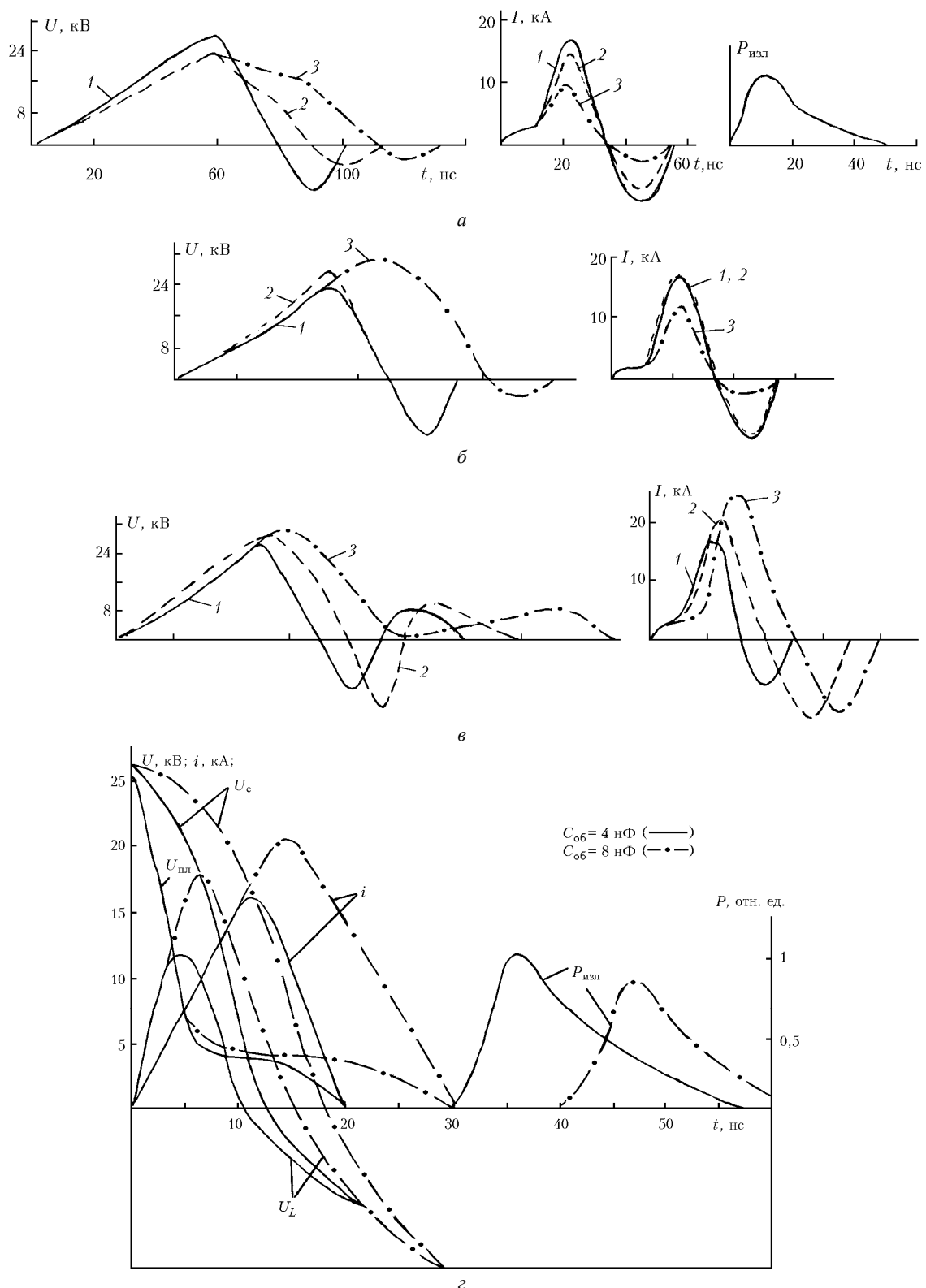


Рис. 8. Типичные для смеси (He)Xe:CCl₄ = 10:1 (2 торр) осциллограммы напряжения на лазерном промежутке, разрядного тока обострительной емкости и зависимости энергии и импульсов излучения от зарядного напряжения (а), от рабочего давления (б), от величины обострительной емкости (в) и расчетные характеристики плазмы (г) для $C_{пл} = 20$ нФ: а - $U_0 = 20$ кВ, 6 мДж (1); 16 кВ, 3,6 мДж (2); 14 кВ, 1 мДж (3) при $P = 2$ атм, $C_{об} = 4$ нФ; б - $P = 1,5$ атм, 3,6 мДж (1); 2 атм, 6 мДж (2); 2,5 атм, 3,2 мДж (3) при $U_0 = 20$ кВ, $C_{об} = 4$ нФ; в - $C_{об} = 4$ нФ, 3,6 мДж (1); 6 нФ, 4 мДж (2); 12 нФ, 2,6 мДж (3) при $U_0 = 20$ кВ, $P = 1,5$ атм; г - расчетные параметры плазмы для $C_{об} = 4; 8$ нФ при $U_0 = 20$ кВ, $P = 1,5$ атм

Увеличение обострительной емкости с 4 до 12 нФ при постоянном зарядном напряжении 20 кВ и давлении 1,5 атм (рис. 8,б) приводило к увеличению постоянной времени нарастания напряжения пробоя на промежутке и его амплитуды. Однако максимальная энергия излучения наблюдалась при обострительной емкости, равной 6 нФ. С дальнейшим ростом $C_{об}$ уменьшалась длительность импульсов генерации и при $C_{об} = 12$ нФ составляла 20 нс. Это связано с тем, что величина обострительной емкости определяет ряд характеристик разряда – время спада напряжения на промежутке, длительность тока коронного разряда и амплитуду разрядного тока. Как известно, значительная плотность разрядного тока обострительной емкости приводит к контракции разряда и соответственно к уменьшению длительности импульсов генерации. В рамках данной модели при контракции разряда энергия, оставшаяся в накопительной емкости, т.е. во втором контуре питания, тратится вхолостую.

Роль $C_{об}$ можно более точно проследить, если измерять напряжение на емкости U_c и на плазме ($U_{пл}$). Оно определялось методом графического дифференцирования осциллограмм разрядного тока [19]. Такая сложная процедура нахождения $U_{пл}$ продиктована тем, что точное измерение $U_{пл}$ для быстрого разряда затруднено из-за высокой скорости нарастания разрядного тока.

На рис. 8,з приведены характеристики газоразрядной плазмы и осциллограммы импульсов излучения для двух значений $C_{об}$, равных 4 и 8 нФ [7]. Для обеих величин $C_{об}$ на зависимостях напряжения на плазме выделяются две характерные стадии: быстрая и квазистационарная. С увеличением обострительной емкости существенных изменений во временном поведении напряжения на стадии его спада не наблюдалось, а длительность квазистационарной стадии значительно возросла. Следовательно, двухконтурные схемы питания с автоматической УФ-предыонизацией автоматически обеспечивают условия формирования длительной квазистационарной стадии разряда.

Характеристики плазмы (см. рис. 8,з) подтверждают экспериментальные результаты исследований зависимости энергии излучения и коэффициента полезного действия (η) от величины обострительной емкости (рис. 9,а) и удельной энергии излучения, а также η от вложенной энергии в активную среду (рис. 9,б). Это подтверждение заключается в следующем.

Максимальная энергия излучения и η были получены при оптимальной емкости $C_{об} = 4$ нФ, хотя для быстрого режима накачки максимальная передача энергии в разряд достигается при выполнении условия $C_{об} \approx C_n$, т.е. при $C_{об} = 20$ нФ. Условие оптимального соотношения емкостей источника питания $C_n/C_{об} \geq 5$ указывало на то, что обострительная емкость обеспечивала оптимально высокое E/N и формировала быструю стадию разряда, которая за счет УФ-предыонизации переходила в квазистационарную стадию с дальнейшим вкладом основной энергии в разряд от накопительной емкости.

Завершая описание самостоятельных разрядов, полученных от двухконтурных источников питания с автоматической коронной УФ-предыонизацией для ХеСл-лазера, отметим следующие их свойства.

1. Существование двух стадий разряда – быстрой и квазистационарной.
2. Время перехода от быстрой к квазистационарной стадии разряда зависит как от соотношения параметров элемен-

тов контуров питания ($C_n/C_{об}$, $L_n/L_{об}$), так и от величины плотности тока в быстрой стадии разряда.

3. Квазистационарный режим накачки, реализуемый при соотношении емкостей контуров питания $C_n/C_{об} \geq 5$, обеспечивает максимальные параметры излучения для ХеСл-лазера.

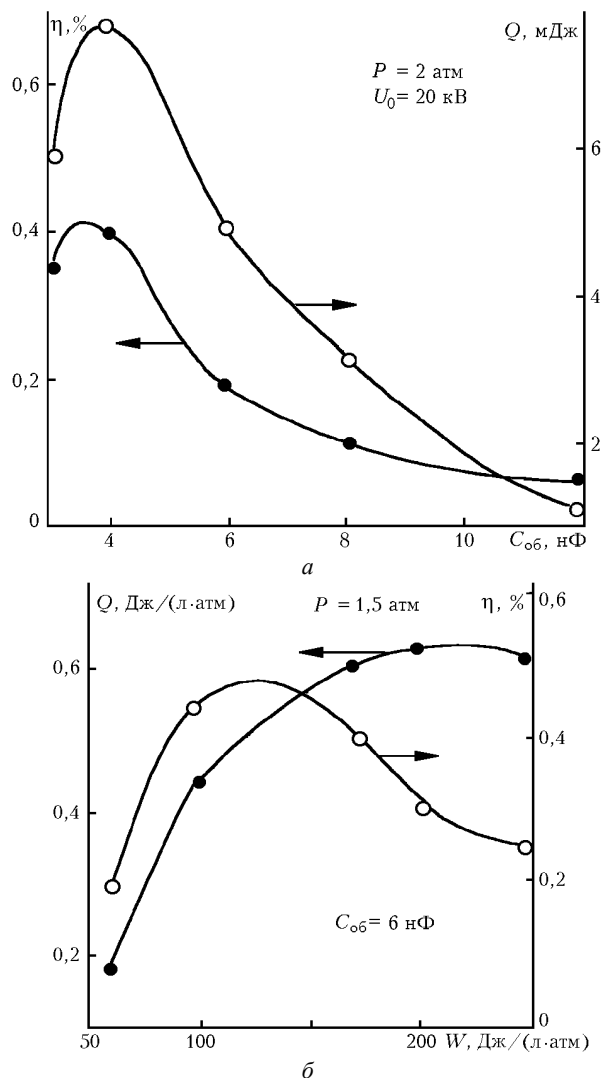


Рис. 9. Зависимости энергии излучения и η в смесях (He)Xe:CCl₄ = 10:1 (2 торр) от величины $C_{об}$ (а) и удельной энергии излучения и η от энергии, вкладываемой в активную среду (б) для двухконтурного источника питания

Таким образом, на основании проведенных исследований длинно-временной режим накачки с учетом свойств активной среды и характеристик плазмы самостоятельного разряда следует назвать «квазистационарным». Кинетические процессы в эксимерных средах в большинстве встречающихся условий, по существу, являются квазистационарными, так как характерные времена возбуждения и ионизации во много раз меньше длительности разрядов накачки [20]. А макроскопические характеристики самостоятельных разрядов (напряжение на плазме и разрядный ток) соответствуют общепринятому определению – квазистационарному. Напомним, что состояние системы называется квазистационарным, если величины, при постоянстве которых оно было

бы стационарным, в действительности медленно меняются со временем. При этом связи между различными свойствами системы остаются такими же, как и в стационарном состоянии [21].

Следовательно, в задачах, связанных с получением длинных импульсов генерации ХеСl-лазеров, предпочтение следует отдавать 2-контурным, а в общем случае – многоконтурным схемам питания газоразрядного промежутка. Для реализации указанного режима квазистационарной накачки в 2-контурных схемах питания с УФ-предыонизацией необходимо выполнение следующих условий: 1) $C_H/C_{06} \geq 5$ (в этом случае мощность накачки в быстрой стадии разряда много выше, чем в квазистационарной стадии разряда); 2) плотность разрядного тока должна быть $< 200 \text{ A/cm}^2$ (в нашем случае она достигалась за счет увеличения площади сечения разряда

или использования активного сопротивления, включенного в электрическую цепь последовательно с разрядным промежутком).

При выполнении этих условий нами впервые был реализован квазистационарный режим накачки с плазменной УФ-предыонизацией и энергией излучения ХеСl-лазера не уступающей параметрам генерации более 250 нс [22].

Заключение

Как отмечалось во введении, использование самостоятельного быстрого разряда и коронной УФ-предыонизации для накачки эксимерных лазеров позволило показать, что параметры излучения ХеСl-лазера не уступают параметрам излучения лазеров на молекулах ХеF и KrF (таблица).

Параметры излучения лазера на молекулах ХеF, KrF и ХеСl с быстрым режимом накачки

Рабочая смесь (буф. газ He)	$V, \text{cm}^3 (D \times H \times L)$	U_0, kV	$P_{\text{опт}}, \text{атм}$	$Q, \text{мДж}$	$\tau_{H/2}^*, \text{нс}$	$\eta, \%$	Литература
Хе:NF ₃ = 1:1	$1,8 \times 0,3 \times 100$	16	0,6	15	25	0,17	[3]
Kr:NF ₃ = 30:1	«	12	0,7	5	25	0,1	[5]
Хе:CCl ₄ = 12:1	«	16	1,8	21	12	0,23	[7]
Хе:CCl ₄ = 20:1	$0,9 \times 0,2 \times 20$	14	3,4	0,36	10	–	[4]
Хе:CHCl ₃ = 20:1	«	14	3,5	0,68	7	–	[4]
							[7]

* $\tau_{H/2}$ – длительность импульса излучения на полувисоте.

Исследование разрядных и энергетических параметров излучения ХеСl-лазера в смесях He:Хе:CCl₄ позволило показать, что объемные самостоятельные разряды, зажигаемые 2-контурными источниками питания с автоматической УФ-предыонизацией, могут обеспечивать не только быстрый, но и квазистационарный режим накачки активной среды, обеспечивающей длинные импульсы генерации. Данный вывод был подтвержден авторами работ [23, 24], которые получили импульсы генерации длительностью до 200 нс с практическим $\eta = 1\%$. В более сложных схемах питания с двумя независимыми источниками накачки были получены импульсы излучения длительностью до 1,4 мкс с $\eta \leq 1\%$ [25]. Преимущества многоконтурных источников питания иллюстрируют результаты работы [26], из которых хотелось бы отметить два. Во-первых, авторы применяли три независимых источника питания: 1) двухконтурный источник предварительного импульса накачки; 2) независимый источник коронной УФ-предыонизации; 3) основной накопительный источник питания, что позволило расширить экспериментальные возможности данной системы питания. Во-вторых, показано, что если источник УФ-предыонизации включается после предварительного импульса накачки, то достигается наилучшее согласование предимпульса с основным импульсом накачки. Это лучшее доказательство того, что предыонизация продолжает воздействовать на активную среду, когда разрядная плазма уже создана [27–29]. Авторами работы [26] были получены импульсы генерации длительностью до 340 нс со средней мощностью излучения 505 Вт.

Таким образом, исследования самостоятельных разрядов и энергетических параметров излучения ХеСl-лазеров с автоматической коронной УФ-предыонизацией и многоконтурными источниками питания для смесей Ar(He):Хе:CCl₄ позволяют сделать следующие выводы.

1. С помощью коронной предыонизации можно получать квазистационарную стадию разрядов высокого давления, в том числе в ХеСl-лазерах даже с одноконтурными источниками питания.

2. Плазма, создаваемая источником коронного разряда, может служить одним из электродов основного разрядного промежутка. Для реализации режима плазменного электрода необходимо наличие перенапряженного разрядного промежутка; автоматического источника коронного разряда, ограниченного диэлектриком и расположенного вблизи одного из электродов, а также наличие тяжелого инертного буферного газа, обеспечивающего преимущественный процесс объемного фотовозбуждения и фотоионизации активной среды.

3. Разряды с плазменными электродами обладают преимуществами. В них отсутствует проблема развития неустойчивости на поверхности электродов, что позволяет получать более высокие удельные энергетические выходы в разряды и удельные энергосъемы лазерного излучения, в частности для молекул ХеСl и ХеF.

4. ХеСl-лазер с коронной предыонизацией позволяет получать параметры излучения, не уступающие параметрам излучения ХеF- и KrF-лазеров.

5. В задачах, связанных с получением длинных импульсов генерации ХеСl-лазера, предпочтение следует отдавать двухконтурным, а в общем случае – многоконтурным схемам питания газоразрядного промежутка.

1. Кудрявцев Ю.А., Кузьмина Н.П. // Квантовая электроника. 1977. Т. 4. № 1. С. 220–222.
2. Ishchenko V.N., Lisitsyn V.N., Razhev A.M. // Opt. Commun. 1977. V. 21. N 1. P. 30–32.
3. Бычков Ю.И., Костин М.Н., Тарасенко В.Ф. и др. // Квант. электр. 1978. Т. 5. № 5. С. 1164–1166.
4. Копылова Т.Н., Грузинский В.В., Данилова В.И. и др. // ЖПС. 1979. Т. 30. № 5. С. 803–811.

5. Костин М.Н., Тарасенко В.Ф., Федоров А.И. // ПТЭ. 1980. № 1. С. 218–219.
6. Бычков Ю.И., Коновалов И.Н., Лосев В.Ф. и др. Лазеры на галогенидах благородных газов // Лазерные системы. Новосибирск: Наука, 1980. С. 29–47.
7. Федоров А.И. Автореферат канд. дис. Томск, 1982. 17 с.
8. Burnham R. // Opt. Commun. 1978. V. 24. N 2. P. 161–163.
9. Sze R.C., Scott P.B. // Appl. Phys. Lett. 1978. V. 33. N 5. P. 419–421.
10. Sze R.C. // IEEE J. Quantum Electron. 1979. V. QE-15. N 12. P. 1338–1347.
11. Федоров А.И., Тарасенко В.Ф., Бычков Ю.И. // Письма в ЖТФ. 1978. Т. 4. Вып. 3. С. 132–135.
12. Тарасенко В.Ф., Тельнов В.А., Федоров А.И. // Известия вузов. Физика. 1979. № 6. С. 91–93.
13. Костин М.Н., Тарасенко В.Ф., Федоров А.И. // ЖТФ. 1980. Т. 50. Вып. 6. С. 1227–1229.
14. Бычков Ю.И., Королев Ю.Д., Орловский В.М. // Известия вузов. Физика. 1971. № 9. С. 45–49.
15. Лозинский Э.Д., Фирсов О.Б. Теория искры. М.: Атомиздат, 1975. 271 с.
16. Тарасенко В.Ф., Федоров А.И., Грузинский В.В. и др. // Известия вузов. Физика. 1980. № 8. С. 121–122.
17. Бычков Ю.И., Коновалов И.Н., Лосев В.Ф. и др. // Известия АН СССР. Сер. Физика. 1978. Т. 42. № 12. С. 2493–2498.
18. Тарасенко В.Ф., Федоров А.И. // Известия вузов. Физика. 1981. № 2. С. 15–19.
19. Фольрат К. Физика быстропротекающих процессов. М.: Мир, 1971. Т. 1. С. 107–116.
20. Мак-Даниель И. и Нигэн У. Газовые лазеры. М.: Мир, 1986. 548 с.
21. Физический энциклопедический словарь. М.: Советская энциклопедия, 1966. Т. 5. 575 с.
22. Бычков Ю.И., Мельченко С.В., Тарасенко В.Ф. и др. // Квантовая электроника. 1982. Т. 9. № 7. С. 1481–1483.
23. Sze R.C. // J. Appl. Phys. 1983. V. 54. N 3. P. 1224–1227.
24. Sze R.C. Proc. Int. Conf. Lasers-83. San Francisco, 1983. P. 512–517.
25. Taylor R.S., Leopold K.E. // J. Appl. Phys. 1989. V. 65. N 1. P. 22–29.
26. Sato Y., Inoue M., Haruta K. et al. // Appl. Phys. Lett. 1994. V. 64. N 6. P. 679–680.
27. Леб Л. Основные процессы электрических разрядов в газах. М.: Гостехиздат, 1950. 485 с.
28. Басов Н.Г., Готов Е.П., Данилычев В.А. и др. // Письма в ЖТФ. 1979. Т. 5. Вып. 8. С. 449–453.
29. Багинский В.М., Басов Н.Г., Головинский П.М. и др. // Письма в ЖТФ. 1985. Т. 11. Вып. 10. С. 627–631.

A.I. Fedorov. Experimental investigations of discharges with automatic corona preionization in XeCl-lasers.

The results of experimental investigations into obtaining volume discharges and their generation in XeCl-lasers with automatic corona preionization are described. It has been shown that for excimer lasers the proposed plasma electrode with a corona discharge shows promise in the case of the use of argon mixtures. The application of multicontour feeding system to a self-maintained discharge is a promising trend in the development of the excimer lasers with long generation pulses.