

Импульсно-периодический DF-лазер с частотой повторения импульсов до 1200 Гц и средней мощностью ~ 25 Вт

И.Л.Буцыкин, С.Д.Великанов, П.А.Евдокимов, А.Ф.Запольский,
Е.В.Ковалев, Б.Е.Кодола, И.Н.Пегоев

Экспериментально изучена работа электроразрядного импульсно-периодического DF-лазера с высотой разрядного промежутка 8–10 мм и циркулирующей рабочей смеси по замкнутому газодинамическому контуру. Приведены основные параметры лазера, описание экспериментов и анализ полученных результатов. Обсуждаются причины падения амплитуды импульсов лазерного излучения и срыва генерации при высокой частоте повторения импульсов. Показано, что основным фактором, снижающим среднюю энергию лазерного излучения с ростом частоты и ведущим к непостоянству энергии излучения во времени и даже к срыву генерации, являются акустические волны, возникающие вследствие импульсно-периодического иницирования рабочей смеси лазера. Описаны приемы подавления возмущений, ведущие к повышению мощности излучения. Достигнута средняя мощность излучения 25–30 Вт при частоте повторения импульсов до 1200 Гц и техническом КПД ~ 2%.

Ключевые слова: электроразрядный DF-лазер, импульсно-периодический лазер, электроды, газодинамический контур, неоднородность плотности смеси, акустические возмущения.

1. Введение

В настоящее время разработке малогабаритных импульсно-периодических DF-лазеров уделяется большое внимание в связи с перспективностью их применения в медицине, экологии и других областях [1, 2]. При этом немаловажной является оптимизация конструкции этих лазеров с точки зрения повышения мощности лазерного излучения, ее постоянства во времени, технического КПД и других характеристик.

Для достижения предельных параметров импульсно-периодических DF-лазеров наряду с разработкой компактной разрядной камеры (РК), генератора импульсного напряжения (ГИН) и способов предыонизации, позволяющих формировать устойчивый объемный разряд, необходима оптимизация состава и давления рабочей смеси (РС) и обеспечение однородности ее потока в межэлектродном промежутке РК.

С повышением частоты повторения импульсов все более жесткие требования предъявляются к объемной однородности энерговклада в основной разряд и к однородности плотности РС в активном объеме лазера. Для сохранения кратности сноса РС в межэлектродном промежутке в рекомендуемых пределах [3] требуется уменьшать ширину основных электродов РК, а это ведет к ухудшению однородности разряда и лишь частично может быть скомпенсировано соответствующими профилированием электродов и конструкцией камеры. Флуктуации плотности РС, вызванные как неоднородностью энерговклада, так и акустическими возмущениями в среде – следствием импульсно-периодического иници-

рования, могут достигать значений, при которых их влияние на однородность и устойчивость объемного разряда становится заметным [4–6].

Настоящая работа является продолжением исследований, результаты которых опубликованы в [2–4, 7].

2. Экспериментальная установка

Установка предназначена для исследования работы DF-лазера в импульсном и импульсно-периодическом режимах. Функциональная схема и конструкция установки подобны приведенным в [6], но, в отличие от последней, для работы обсуждаемой установки не требовались теплообменник и система осаждения серы. Основным элементом установки является газодинамический контур – замкнутая кольцевая полость между наружным и внутренним корпусами, в которой размещаются осевые вентиляторы для создания потока РС, фильтр, заполненный сорбентом, для очистки РС от продуктов химических реакций и диэлектрические направляющие потока. В самом узком месте контура газовый поток проходит через межэлектродный промежуток. В зависимости от типа и числа используемых вентиляторов, конструкции встроенных в РК электродов и расстояния между ними скорость РС в промежутке могла находиться в пределах 12–36 м/с.

Конструкция и место расположения фильтра выбирались с учетом обеспечения его минимального газодинамического сопротивления. В качестве сорбента, как и в [2–4], применялся активированный Al_2O_3 с размером гранул 2–3 мм. Гранулы засыпались между двумя металлическими сетками, размещенными перед вентиляторами.

РК была выполнена в виде отдельного блока, в котором организован сужающийся с обеих сторон к межэлектродному промежутку газодинамический канал, имеющий в наиболее узком месте сечение (8–10) × 280 мм.

Российский федеральный ядерный центр – ВНИИЭФ, Россия, 607190 Саров Нижегородской обл., просп. Мира 37; тел.: (83130) 456 46; факс: (83130) 545 65; e-mail: velikanov@otd13.vniief.ru

В центральной части РК закреплены основные электроды – анод и катод, а также электроды предыонизации, подсоединенные к катоду через разделительные конденсаторы и высоковольтные шины.

Основные электроды РК изготавливались из алюминиевого сплава и имели профиль Степперча [8] шириной 18 мм с гладкой поверхностью (гладкие) или с насечкой в виде лезвий на профильной поверхности (лезвийные). Особенности формирования объемного разряда между такими электродами при однократном инициировании смеси приведены в [7]. Такими же, как и в работе [7], были и электроды предыонизации.

На торцах лазерного блока соосно с продольной осью РК располагались устройства для крепления и юстировки зеркал оптического резонатора. В экспериментах применялись плоские зеркала из CaF_2 с диэлектрическим покрытием на внешних поверхностях. Коэффициенты отражения в спектральном интервале излучения молекулы DF^* составляли ~ 0.96 для «глухого» и ~ 0.65 для выходного зеркал.

ГИН был выполнен по схеме однокаскадного генератора Фитча с удвоением напряжения. Путем изменения числа конденсаторов емкость ГИНа могла меняться в широких пределах; соответственно изменялась его запасенная энергия E_{st} . В качестве коммутирующего устройства применялся управляемый разрядник или тиратрон.

Зарядка конденсаторов ГИНа до определенного напряжения U производилась с помощью импульсного зарядного устройства. По сигналу с системы управления импульсно-периодическим режимом срабатывало коммутирующее устройство и ГИН разряжался на РК; при этом вначале происходила зарядка разделительных конденсаторов. При их зарядке между электродами предыонизации и анодом возникали искровые разряды, УФ излучение которых стимулировало основной разряд между анодом и катодом. Происходила ионизация компонентов РС, формировался объемный разряд и с некоторой задержкой генерировался лазерный импульс.

С помощью осциллографов одновременно регистрировались импульсы напряжения U конденсаторов ГИНа и сигналы с пиродетектора, фиксирующие амплитуду и частоту импульсов генерации. Суммарная энергия лазерного излучения в серии импульсов измерялась термометрическими калориметрами.

Давление РС p_m в экспериментах варьировалось в пределах 0.08–0.75 ат. Соотношение активных компонентов РС во всех экспериментах было неизменным – $\text{SF}_6 : \text{D}_2 = 6 : 1$; это соотношение считается оптимальным для подобных DF -лазеров [3]. Конструкция лазерного блока позволяла непосредственно наблюдать разряд между основными электродами в видимой области спектра. Фотосъемка разряда осуществлялась фотоаппаратом через прозрачное боковое окно, а в ряде случаев – через выходное зеркало резонатора.

3. Экспериментальные исследования

При обеспечении необходимой кратности сноса РС между импульсами, обеспечивающей восстановление генерационных свойств и прозрачности смеси, и при отсутствии влияния предшествующих импульсов на последующие амплитуда и форма импульсов лазерного излучения в импульсно-периодическом режиме и в режиме одиночных импульсов должны быть практически иден-

тичными. Проведенные нами предварительные исследования по оптимизации установки подтвердили это предположение.

В первых экспериментах в импульсно-периодическом режиме исследовалась возможность применения различных электродных пар, рассмотренных ранее в [7]: оба электрода гладкие, гладкий анод и лезвийный катод, оба электрода лезвийные; во всех случаях расстояние между ними составляло 8 мм. При постоянных $U = 18$ кВ и $E_{st} \sim 1.44$ Дж регистрировалась средняя за 0.1 с энергия лазерных импульсов. Частота повторения импульсов f от опыта к опыту ступенчато увеличивалась. Скорость потока РС в межэлектродном промежутке варьировалась в пределах 36–28 м/с, а кратность сноса РС от импульса к импульсу падала обратно пропорционально f . За время 0.1 с РС не успевала сделать полного оборота в газодинамическом контуре, поэтому ее состав, плотность и температуру можно считать неизменными.

На рис. 1, а показана зависимость средней энергии E_0 в импульсах лазерного излучения от частоты f для всех комбинаций электродов. Как и в [7], наилучшей оказалась комбинация с обоими лезвийными электродами, срыв генерации для которой наблюдался при $f_c \sim 800$ Гц, для других комбинаций f_c составила ~ 650 и 250 Гц. Применение лезвийных электродов эквивалентно повышению U и увеличивает эффективность лазера; при этом улучшается и устойчивость горения разряда.

Низкое значение f_c для двух гладких электродов можно объяснить большими возмущениями потока РС в межэлектродном промежутке вследствие выступания электродов за диэлектрические направляющие потока на 3 мм. В этом случае скорость потока V в межэлектродном промежутке составила ~ 36 м/с. При двух лезвийных электродах за диэлектрические направляющие потока выступают только лезвия, и вносимые ими в поток возмущения существенно меньше, чем в случае гладких электродов. Кроме того, у кромок лезвий происходит значительное обострение электрического поля (согласно [9], пятикратное и более), что облегчает формирование разряда. Оба фактора способствовали увеличению средней энергии в импульсах и увеличению f и f_c по сравнению с этими величинами в случае комбинации из двух гладких электродов.

Однако из фотографий объемного разряда следовало, что его однородность для комбинации из гладкого анода и лезвийного катода лучше, чем для двух лезвийных электродов. Поскольку проигрыш в лазерной энер-

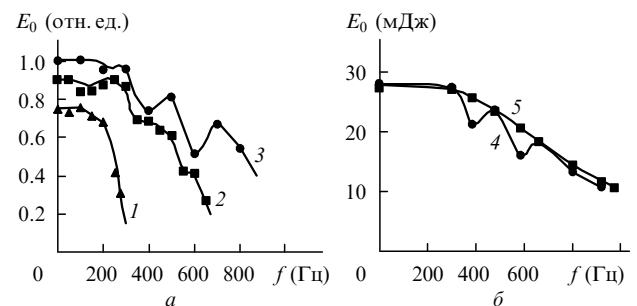


Рис. 1. Зависимости средней за 0.1 с энергии лазерных импульсов от частоты повторения импульсов при $p_m = 0.16$ ат ($\text{SF}_6 - \text{D}_2$) в экспериментах с разрядником РУ78, без сеток: оба электрода гладкие (1), гладкий анод и лезвийный катод (2), оба электрода лезвийные (3) (а) и в экспериментах с тиратроном ТП-10к/25, гладким анодом и лезвийным катодом: без сеток (4), с дополнительными сетками (5) (б).

гии не очень велик, решено было взять эту комбинацию за основу. Межэлектродное расстояние было увеличено до 10 мм и скорость в межэлектродном промежутке снизилась до ~ 28 м/с, что привело к уменьшению возмущений потока. Зависимость средней энергии E_0 в импульсах лазерного излучения от частоты инициирования для этих условий экспериментов показана на рис.1,б (кривая 4).

Ранее уже было сказано о роли возмущений потока в межэлектродном промежутке, вызванных выступанием электродов за диэлектрические направляющие потока. Есть и другие причины, ведущие к значительной разности плотности РС и к срыву генерации при небольшой частоте повторения импульсов. Однородность плотности РС нарушается не только периодическим практически мгновенным выделением энергии в импульсных разрядах (эти неоднородности выносятся из активной области потоком РС), но и тем, что при импульсных разрядах возникают ударные волны. Имея небольшую амплитуду, эти волны быстро трансформируются в акустические, которые, отражаясь от различных поверхностей газодинамического контура и взаимодействуя друг с другом, приводят к локальным неоднородностям давления и плотности РС в межэлектродном промежутке. Данный эффект отмечался ранее в работе [3]. Эти явления присущи, по-видимому, импульсно-периодическим лазерам любой конструкции. Конструкцией же определяются особенности указанных явлений и способы борьбы с ними.

Как выяснилось в дальнейших исследованиях, в DF-лазере могут иметь место резонансные явления и эффекты сродни стробоскопическому. Каждый последующий импульсный разряд может совпадать или не совпадать во времени и пространстве с неблагоприятным результатом взаимодействия акустических возмущений: там, где РС значительно уплотнена, разряда не происходит, а там, где плотность понижена, может возникнуть стример. Наличие в межэлектродном промежутке многих участков, где разряд не формируется или не эффективен, фактически уменьшает активную область, что само по себе ведет к снижению энергии генерации.

Показанные на рис.1,а зависимости имеют характерную особенность, подтверждающую сказанное. Наблюдается волнообразный характер зависимости средней энергии лазерных импульсов от частоты f , когда один из электродов лезвийный. Локальные минимумы энергии повторяются с периодом ~ 200 Гц.

На рис.1,б локальные минимумы зависимости 4 также смещены один относительно другого на ~ 200 Гц. По всей видимости, основной вклад в появление этих минимумов дают акустические возмущения, распространяющиеся вверх по потоку и возвращающиеся в активную область после отражения от пластины крепления вентиляторов. Возмущения, движущиеся в противоположном направлении, очевидно, глушатся фильтром с сорбентом. Оценка времени прихода в межэлектродный промежуток волны, отраженной от пластины крепления вентиляторов, для данной конструкции ИПХЛ дает ~ 5.4 мс. Таким образом, для части импульсов при частотах, кратных $\Delta f = 1/5.4 \cdot 10^{-3} \text{ с} \sim 190$ Гц, плотность РС в межэлектродном промежутке могла быть неоптимальной, что приводит к падению энергии генерации. Период $\Delta f = 190$ Гц хорошо согласуется с наблюдаемым в экспериментах периодом повторения минимумов ~ 200 Гц.

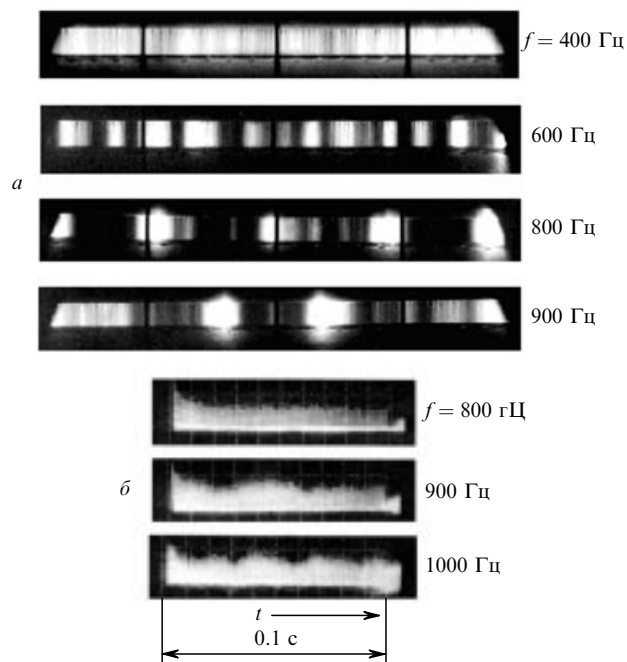


Рис.2. Свечение разряда в смеси $\text{SF}_6 - \text{D}_2$ при разных частотах повторения импульсов вдоль электродов (а) и изменение энергии генерации в пути импульсов в отсутствие наклона боковых стенок при $p_m = 0.16$ ат (б).

Была предпринята попытка избавиться от упомянутых выше акустических возмущений путем установки на их пути конструкции из двух металлических сеток с общей прозрачностью $\sim 40\%$. Результаты экспериментов с дополнительными сетками представлены на рис.1,б (кривая 5). Из сравнения кривых 4 и 5 рис.1,б следует, что за счет подавления волн, распространявшихся вверх по потоку, периодическое изменение средней энергии в импульсах генерации с ростом частоты f удалось устранить, что подтвердило высказанное выше предположение. Однако падение средней энергии в импульсах при частотах, превышающих 250–300 Гц, осталось.

Приведем еще свидетельство того, что именно взаимодействие акустических волн влияет на формирование неоднородного объемного разряда и, как следствие, ведет к уменьшению средней энергии лазерных импульсов. На рис.2,а для разных частот приведены фотографии интегрального (за 0.1 с) свечения разрядов вдоль электродов в видимом свете. Три темных полосы на рис.2,а – тени от обратных токопроводов. Анализ этих фотографий позволяет сделать предположение о влиянии акустических волн, распространяющихся поперек газового потока вдоль оси излучения лазера, на формирование объемного разряда. Яркость свечения повышена в местах пониженной плотности, и наоборот – свечение, как правило, отсутствует там, где плотность повышена. Оценки показывают, что расстояние между центрами темных (и ярких) областей соответствует совпадению фронтов (и участков разрежения) акустических волн, идущих навстречу друг другу после отражения от боковых поверхностей – мест крепления зеркал резонатора. С увеличением частоты темные и яркие области расширяются и смещаются, т. е. наблюдается явный стробоскопический эффект.

Уменьшить или исключить полностью влияние этих волн можно, наклонив боковые стенки камеры к оси

активной области (оси резонатора), в том числе и введя внутрь резонатора наклоненные к оси оптические окна. В конструкции лазерного блока был выполнен только наклон боковых стенок РК на 30° к оси и навстречу друг другу, что позволило улучшить однородность разряда. Вышесказанное иллюстрируется осциллограммами рис. 2,б. В данном случае боковые стенки не наклонены и дополнительные сетки отсутствуют. За первые 10–12 импульсов их энергия уменьшается до 0.6–0.7 от первоначальной и далее колеблется вблизи этого значения. Начальное падение энергии, по-видимому, связано с накоплением между лезвиями нагретой и частично ионизованной смеси. Последующие колебания энергии явно есть следствие взаимодействия акустических волн в РС, подавление которых любым путем могло бы привести к снижению пульсаций энергии в цуге лазерных импульсов.

Радикальным средством подавления акустических волн в межэлектродном промежутке стало увеличение скорости звука V_s в РС за счет разбавления ее легким газом, в частности гелием. Увеличение скорости звука в смеси способствует более быстрому выравниванию неоднородностей ее плотности в промежутках между импульсами. При этом изменение электрических свойств РС позволяет также ожидать улучшения однородности и устойчивости импульсных разрядов.

Свечение разряда в видимом свете в экспериментах с добавлением в РС гелия при давлении 0.45 ат для разных частот инициирования показано на рис.3,а. Сравнение этих фотографий с приведенными на рис.2,а говорит о значительном улучшении однородности разряда в смесях при добавлении He, в том числе и на частотах до 1200 Гц и более. В этих и во всех последующих экспериментах выполнен наклон боковых поверхностей и поставлены дополнительные сетки.

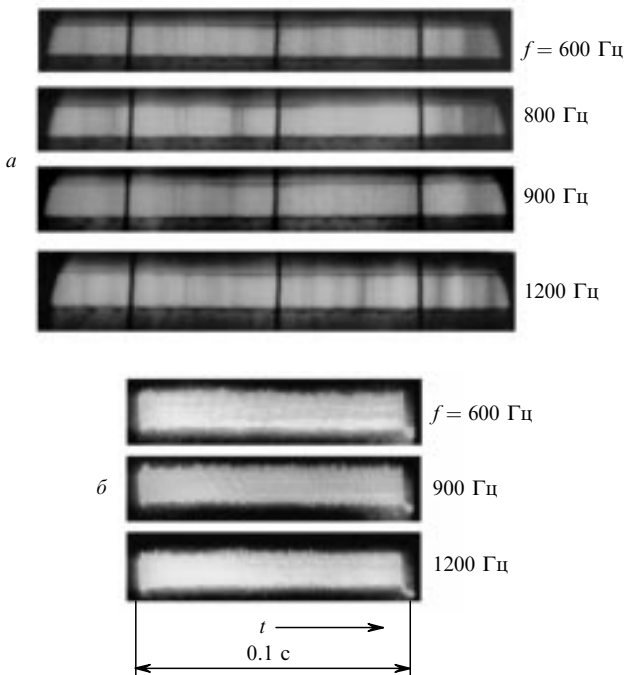


Рис.3. Свечение разряда вдоль электродов в смеси SF₆ – D₂ ($p_m = 0.14$ ат) при добавлении 0.45 ат He (а) и изменение энергии генерации в цуге импульсов (б) для разных частот повторения импульсов при боковых стенках, наклоненных на 30° к оси резонатора, и дополнительных сетках.

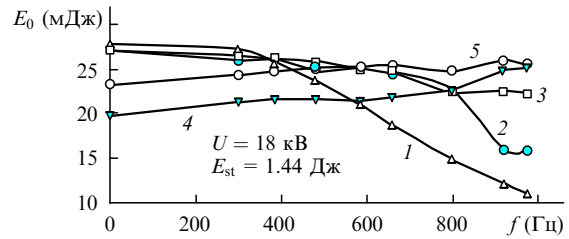


Рис.4. Зависимости средней энергии генерации E_0 от частоты повторения импульсов и содержания He в рабочей смеси при разных p_m и V_s :

- 1 – $p_m = 0.16$ ат (SF₆ – D₂), $V_s \sim 146$ м/с;
- 2 – $p_m = 0.16$ ат (SF₆ – D₂) + 0.15 ат He, $V_s \sim 207$ м/с;
- 3 – $p_m = 0.14$ ат (SF₆ – D₂) + 0.3 ат He, $V_s \sim 267$ м/с;
- 4 – $p_m = 0.14$ ат (SF₆ – D₂) + 0.45 ат He, $V_s \sim 331$ м/с;
- 5 – $p_m = 0.14$ ат (SF₆ – D₂) + 0.6 ат He, $V_s \sim 395$ м/с.

На рис.3,б приведены осциллограммы лазерных импульсов при разных частотах инициирования для РС с давлением He 0.45 ат. Из сравнения осциллограмм, приведенных на рис.2,б и 3,б, следует, что пульсации энергии в цуге импульсов генерации при разбавлении РС гелием значительно уменьшились и исчезло имевшее место для смесей без He падение энергии в первых лазерных импульсах.

На рис.4 приведены зависимости средней энергии в импульсах лазерного излучения от частоты их повторения для РС с разным содержанием гелия и без него при постоянных $U = 18$ кВ и $E_{st} \sim 1.44$ Дж. Естественно, для улучшения согласования сопротивлений ГИНа и плазмы разряда при больших концентрациях гелия в смеси парциальные давления активных компонентов требовалось уменьшать. Из рис.4 следует, что максимальная энергия генерации E_0 на частотах порядка 1000 Гц была получена при давлении гелия в РС ~ 0.45 ат. Пониженная концентрация SF₆ и большое содержание буферного газа для зависимостей 4 и 5 на рис.4 привело к уменьшению E_0 на малых частотах повторения импульсов; на высоких частотах повторения средняя энергия повышается, достигая при $f = 1000$ Гц ~ 0.9 от энергии при однократном инициировании смеси без He. Достигнута мощность излучения $E_0 f \sim 26 \cdot 10^{-3}$ Дж $\cdot 1000$ с⁻¹ ~ 26 Вт и технический КПД $100 E_0 / E_{st} \sim 100 \cdot 26 \cdot 10^{-3}$ Дж / 1.44 Дж ~ 1.8 %.

Эксперименты были продолжены на частотах 1100, 1200 Гц и более, но с меньшими U и E_{st} из-за ограничений мощности используемого импульсного зарядного устройства. Технический КПД для зависимостей 4 и 5, равный примерно 1.8–2 %, сохраняется и на этих частотах. Практическое постоянство энергии генерации с ростом f до ~ 1000 Гц при большом содержании He говорит об оптимальности условий инициирования РС, которые были найдены в процессе исследований.

4. Заключение

Таким образом, в результате исследований создан DF-лазер мощностью 25–30 Вт с частотой повторения импульсов до 1200 Гц и КПД ~ 2 %. Основным фактором, снижающим среднюю энергию в лазерных импульсах и ведущим даже к срыву генерации задолго до достижения предельной для подобных лазеров частоты, являются акустические возмущения в активном объеме, обусловленные импульсно-периодическим инициированием смеси. Взаимодействие акустических волн в среде

приводит к неоднородностям плотности смеси в межэлектродном промежутке и, как следствие, к ухудшению однородности разряда, локальным перегревам смеси, появлению стримеров и к снижению энергии лазерных импульсов.

Достижению максимальных энергетических параметров лазера могут способствовать следующие технические решения:

– применение электродной системы с профилированными лезвийными электродами, обостряющими электрическое поле и не вносящими существенных возмущений в поток рабочей смеси;

– подавление акустических возмущений в активном объеме путем наклона боковых стенок газодинамического контура в зоне резонатора и постановкой двух дополнительных металлических сеток на пути потока от вентиляторов к разрядной камере, устраняющих отражение части акустических волн от деталей конструкции;

– более чем трехкратное разбавление рабочей смеси SF₆ – D₂ гелием; при этом за счет значительного увели-

чения скорости звука разнородность смеси, неполностью устраняемая упомянутыми выше конструктивными изменениями, успевает за время между импульсами уменьшиться до значений, мало влияющих на качество разрядов и генерационные свойства смеси.

1. Хинкли Э.Д. (ред). *Лазерный контроль атмосферы* (М., Мир, 1979).
2. Великанов С.Д., Елутин А.С., Кудряшов Е.А. и др. *Квантовая электроника*, **24**, 279 (1997).
3. Великанов С.Д., Запольский А.Ф., Фролов Ю.Н. *Квантовая электроника*, **24**, 11 (1997).
4. Борисов В.П., Бурцев В.В., Великанов С.Д. и др. *Квантовая электроника*, **22**, 645 (1995).
5. Баранов В.Ю. и др. *Квантовая электроника*, **7**, 2589 (1980).
6. Rudko R.I., Drozdowicz Z., Linhares S., Vua D. *Rev.Sci Instrum.*, **53**, 452 (1982).
7. Великанов С.Д., Евдокимов П.А., Запольский А.Ф. и др. *Квантовая электроника*, **25**, 925 (1998).
8. Stappaerts E.A. *Appl.Phys.Letts*, **40**, 1018 (1982).
9. Бугаев С.П., Крейнделъ Ю.Б., Шагин П.М. *Электронные пучки большого сечения* (М., Энергоатомиздат, 1984, с. 81).