

## Диффузные и объемные разряды в лазерах высокого давления с накачкой поперечным разрядом (обзор)

В. Ф. Тарасенко, А. Н. Панченко, Д. В. Белоplotов

*Проведено исследование условий формирования и свойств диффузных и объемных разрядов, которые широко используются при высоких давлениях различных газов и их смесей для получения генерации в ВУФ, УФ, видимой и ИК-областях спектра. Установлено, что спектральные характеристики излучения объемных и диффузных разрядов подобны. Показано, что отличие данных режимов разрядов связано с условиями их формирования. Диффузные разряды формируются за счёт быстрых и убегающих электронов, для генерации которых следует использовать один или оба электрода с малым радиусом кривизны. При получении объемных разрядов необходимо осуществлять предыонизацию разрядного промежутка от дополнительного источника, а также обеспечивать однородное электрическое поле между электродами.*

*Ключевые слова:* диффузный и объемный разряды, однородное и неоднородное электрическое поле, предыонизация, стримеры, волны ионизации, быстрые и убегающие электроны.

**Ссылка:** Тарасенко В. Ф., Панченко А. Н., Белоplotов Д. В. // Успехи прикладной физики. 2019. Т. 7. № 6. С. 535.

**Reference:** V. F. Tarasenko, A. N. Panchenko, and D. V. Beloplotov, Usp. Prikl. Fiz. 7 (6), 535 (2019).

### Введение

Для накачки лазеров на плотных газах с поперечным разрядом широко применяются объемные разряды [1–4]. Данные разряды формируются за счёт предварительной ионизации газовой смеси или облучения катода (многоэлектронное инициирование [5]) от дополнительных источников. Предыонизация осуществляется пучком электронов [6–12],

УФ, ВУФ и рентгеновским излучением [13–16]. При получении объемного разряда в промежутке нужно создать начальные электроны с достаточно высокой концентрацией, а также использовать электроды, обеспечивающие электрическое поле в промежутке, близкое к однородному. Как было показано в [17], при создании начальной концентрации электронов выше пороговой головки электронных лавин, которые формируются в газовых смесях, перекрываются до образования стримера, и в промежутке формируется объемный разряд. При этом важно сохранять у катода достаточное число начальных электронов, чтобы компенсировать их уход за счёт дрейфа. Далее, для поддержания разряда необходимо высокое электрическое поле у отрицательного электрода. Это обеспечивается за счёт накопления положительных ионов, часть которых определяет эмиссию электронов с катода. Объемные разряды широко используются при создании

---

Тарасенко Виктор Федотович, зав. лаб., д.ф.-м.н.  
Панченко Алексей Николаевич, ст.н.с., д.ф.-м.н.  
Белоplotов Дмитрий Викторович, н.с., к.ф.-м.н.  
Институт сильноточной электроники СО РАН.  
Россия, 634055, г. Томск, пр. Академический, 2/3.  
E-mail: vft@loi.hcei.tsc.ru; alexei@loi.hcei.tsc.ru;  
rff.qep.bdim@gmail.com

Статья поступила в редакцию 18 октября 2019 г.

© Тарасенко В. Ф., Панченко А. Н.,  
Белоplotов Д. В., 2019

СО<sub>2</sub>-лазеров высокого давления, а также эксимерных (эксимерных) лазеров [1–17].

При формировании диффузных разрядов дополнительные источники для предыонизации промежутка не нужны. Однако как минимум один из электродов, лучше катод, должен иметь малый радиус кривизны [18–21], например, состоять из большого числа параллельно установленных острий [13]. Благодаря усилению электрического поля у электрода с малым радиусом кривизны, в том числе за счет микронеоднородностей на нём, а также усилению электрического поля на фронте волны ионизации, генерируются быстрые и убегающие электроны, которые приводят к формированию диффузных разрядов в различных газах при стримерном механизме пробоя [22]. Быстрыми электронами называем электроны, которые достигают в усиленном электрическом поле у катода и в промежутке энергий в сотни эВ – единицы кэВ, а затем теряют свою энергию при уходе в область более низкого поля (см. также [23]). Это происходит в стадии пробоя промежутка широкими стримерами [24]. После замыкания промежутка широким стримером формируется диффузный разряд, который при увеличении амплитуды импульса напряжения и (или) его длительности, а также при уменьшении межэлектродного зазора может переходить в искровой. Убегающие электроны набирают энергию в десятки–сотни кэВ и, как правило, достигают анода [18–21]. Убегающие электроны и рентгеновское излучение за анодной фольгой или сеткой могут быть использованы в другом промежутке, в том числе с той же газовой смесью, для формирования объёмного разряда и для получения при высоких давлениях лазерного излучения [15, 16, 25].

Цель настоящей работы – исследовать и проанализировать условия формирования диффузных и объёмных разрядов и сравнить их свойства.

### **Диффузные разряды, формируемые в неоднородном электрическом поле**

О получении диффузных разрядов в гелии и воздухе атмосферного давления впервые было сообщено, соответственно, в работах [26] и [27]. В экспериментах для формирова-

ния разряда использовались импульсные генераторы высокого напряжения, которые подключались к промежуткам острий (катод) – плоскость (анод). В обеих работах было зарегистрировано рентгеновское излучение, которое обусловлено генерацией убегающих электронов в разрядном промежутке, и без применения дополнительного источника для предыонизации промежутка  $d$  был сформирован диффузный разряд. Подобный режим разряда также был использован для получения генерации на молекулах СО<sub>2</sub> в ИК-области спектра при атмосферном давлении смеси He-N<sub>2</sub>-СО<sub>2</sub> [28]. Разряд формировался в промежутке с  $d = 2$  см между катодом, состоящим из 100 острий, и цилиндрическим анодом. Каждое из 100 острий было образовано одним из выводов резистора величиной 1000 Ом. Электродный узел и анод имели длину 75 см. Измерения рентгеновского излучения в [28] не проводились.

В работе [29] было показано, что диффузный разряд в воздухе атмосферного давления можно сформировать не только с отрицательной полярностью электрода, имеющего малый радиус кривизны, но и с положительной. При обеих полярностях наносекундных импульсов разряд был однородный, однако пространственное распределение области его свечения несколько отличалось. Диаметр разряда у трубчатого катода положительной полярности был больше.

Применение двух электродов в виде лезвий позволило получить генерацию в ВУФ, УФ, видимой и ИК-областях спектра при высоких давлениях различных газов и их смесей [30–33]. Ещё раз отметим, что в работах [26–33] отсутствовали дополнительные источники для предыонизации разрядного промежутка.

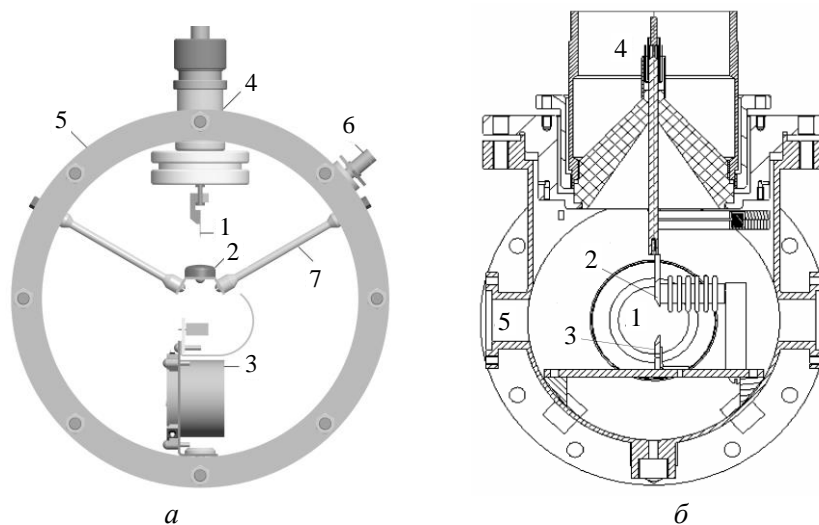
На рис. 1 показано поперечное сечение двух лазерных камер, в которых для накачки различных газовых лазеров использовался диффузный разряд.

В установке № 1 применялся катод, состоящий из 50 острий, изготовленных из швейных иголок диаметром 0,7 мм и расположенных на одной линии, а также анод со сферической поверхностью. Длина возбуждаемой области составляла 35 см, а  $d = 6$  мм. Для работы при высокой частоте следования импульсов в разрядной камере устанавливались вентиляторы, которые обеспечивали ско-

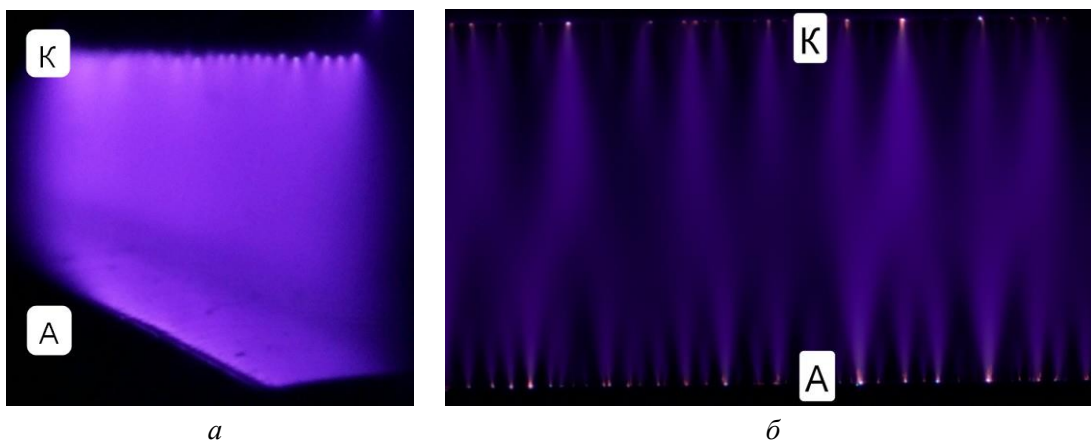
рость прокачки газа до 20 м/с. На торцах камеры располагались кварцевые окна или зеркала. Для возбуждения разряда использовался четырёхканальный генератор FPG-60 (амплитуда импульса напряжения  $U = 30$  кВ, длительность импульса на полувысоте при согласованной нагрузке  $\tau_{0,5} \approx 4$  нс, длительностью фронта импульса  $\tau_{0,1-0,9} \approx 3$  нс).

Во второй установке применялись два электрода с малым радиусом кривизны, изготовленные в виде лезвий. Прокачка рабочей смеси не была предусмотрена, поэтому частота следования импульсов обычно не превышала 1 Гц. Длина возбуждаемой области со-

ставляла 30 см, а разрядный промежуток мог изменяться от 6 до 18 мм. На установке № 2 дополнительно были установлены окна для фотографирования разряда сбоку. Для возбуждения разряда применялся генератор РАДАН-220 с  $U = 200$  кВ,  $\tau_{0,5} \approx 2$  нс при согласованной нагрузке и  $\tau_{0,1-0,9} \approx 0,5$  нс. Диффузный разряд и лазерное излучение были получены на данных установках во многих газах и газовых смесях при давлениях от долей до сотен кПа. Подробно характеристики излучения для ряда лазеров описаны в работах [30–33]. Фотографии диффузного разряда в азоте приведены на рис. 2.



**Рис. 1.** Сечения лазерных камер: а) – конструкция разрядной камеры в установке № 1: 1 – катод, 2 – анод, 3 – вентилятор, 4 – один из вводов высокого напряжения от четырёхканального генератора FPG-60, 5 – корпус камеры, 6 – вывод для подключения к шунту, 7 – подводы для крепления анода; б) – конструкция разрядной камеры в установке № 2: 1 – зеркало резонатора, 2 – катод, 3 – анод, 4 – ввод высокого напряжения от генератора РАДАН-220, 5 – окно для фотографирования разряда.



**Рис. 2.** Фотографии диффузного разряда, полученные на установке № 1 (а) и № 2 (б): а) – азот при давлении 100 кПа, частота следования импульсов 2 кГц, межэлектродный зазор 6 мм, катод сверху; б) – смесь гелия (300 кПа) с азотом (0,2 кПа), частота следования импульсов 1 Гц, межэлектродный зазор 18 мм.

Разряд на установке № 1 фотографировался через окно на торце разрядной камеры под углом к центральной оси. Видно, что он имеет однородное свечение по длине промежутка и только на кончиках игл заметны относительно яркие пятна. На аноде яркие пятна в этом режиме не наблюдались. Также отсутствовали искровые лидеры, которые в других режимах могут прорасти с ярких пятен на электродах. Благодаря прокачке азота через промежуток разряд при давлении 100 кПа остаётся однородным при высоких частотах следования импульсов (до 2 кГц в данных экспериментах). Отметим что, если газ успеваеет заменяться в промежутке между импульсами и не перегревается, однородность разряда в импульсно-периодическом режиме улучшается по сравнению с режимом однократных импульсов. Это позволяет использовать диффузный разряд при высоких частотах следования импульсов для получения лазерного излучения, в частности, на длине волны 337,1 нм второй положительной системы азота [33]. Оптимальное давление азота для генерации в [33] составило 40 кПа.

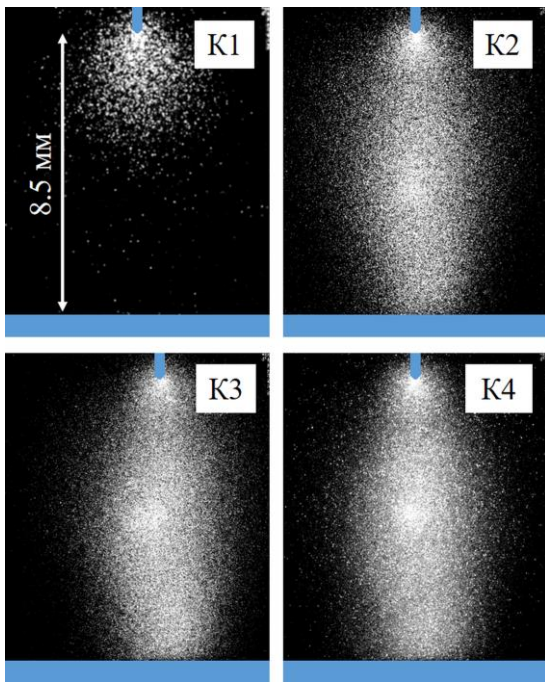
При использовании двух электродов в виде лезвий на установке № 2 (см. рис. 1, б) также формировался диффузный разряд в различных газах без использования дополнительного источника для предыонизации лазерного промежутка. На рис. 2, б показана фотография диффузного разряда в смеси гелия с азотом, полученная за один импульс при высоком давлении (300,2 кПа). В этих условиях диффузный разряд состоял из диффузных струй, начинающихся с ярких пятен на электродах. Из спектральных измерений следовало, что при возбуждении чистого азота в спонтанном излучении разряда на обеих установках наибольшую интенсивность имеют полосы второй положительной системы азота.

Исследование диффузных разрядов показало, что они, в отличие от объёмных разрядов, формируются по стримерному механизму. На рис. 3 приведены фотографии свечения промежутка при пробое между остриём и плоскостью и соответствующие им осциллограммы импульсов напряжения и тока через

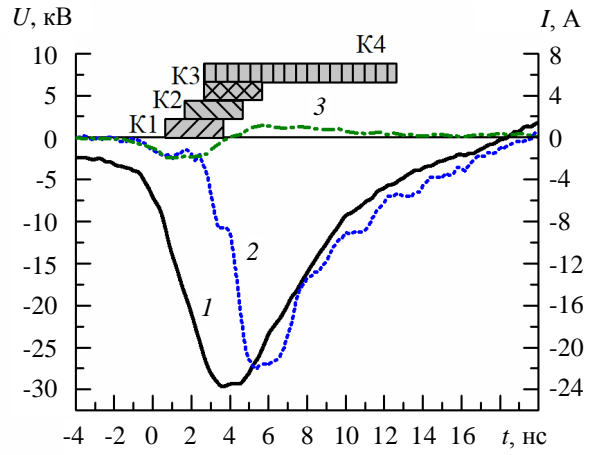
промежуток. На рис. 3, в также показана осциллограмма тока пучка убегающих электронов, полученная в отдельной серии экспериментов и зарегистрированная с помощью коллектора осциллографом KeySight DSO-X6004A (6 ГГц, 20 выборок за наносекунду).

В данных экспериментах использовался промежуток длиной 8,5 мм, на который подавались импульсы напряжения от высоковольтного генератора NPG18/2000N ( $U = 15$  кВ,  $\tau_{0,1-0,9} \approx 4$  нс,  $\tau_{0,5} \approx 10$  нс) отрицательной полярности. Высоковольтный электрод был изготовлен из швейной иглы длиной 5 мм, диаметром основания 1 мм и радиусом закругления кончика 75 мкм. Заземлённый электрод был плоским. При пробое промежутка у острия появляется стример шаровой формы, который расширяется по мере его продвижения к аноду (см. также работы [22, 24, 34]). После замыкания стримером промежутка формировался диффузный разряд, диаметр которого постепенно уменьшался. Как было показано во многих работах [18–21, 22, 34], в промежутках с катодом, имеющим малый радиус кривизны, за счёт концентрации электрического поля на его макро- и микро-однородностях, а также за счёт усиления электрического поля на фронте волны ионизации (стримера) генерируются быстрые и убегающие электроны. Высокоэнергетические электроны осуществляют предыонизацию газа, необходимую для формирования диффузных разрядов. В условиях, показанных на рис. 2 и рис. 3, диффузный разряд сохранялся в течение всего импульса напряжения, хотя длительность его увеличивалась из-за разных сопротивлений разрядного промежутка и генератора.

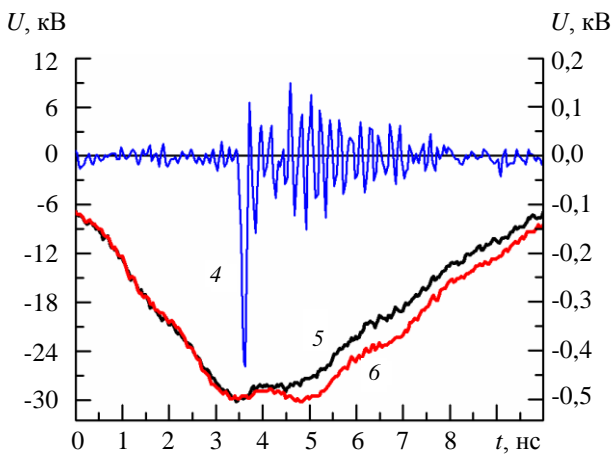
Как известно, время сохранения диффузного разряда при увеличении длительности импульса напряжения и давления газа ограничено переходом в искровую стадию. При этом, замыкание промежутка искрой происходит за счёт искровых лидеров, которые стартуют с одного из электродов [21, 35]. На рис. 4 приведена фотография свечения промежутка, полученная за один импульс.



а



б



в

Рис. 3. Диффузный разряд в разрядной камере: а) – ICCD-изображения свечения плазмы в различные моменты времени при разряде в азоте при атмосферном давлении. К1–К4 – каналы ICCD камеры; б) – осциллограммы напряжения (1) и тока разряда (2), а также ток смещения (3) рассчитанный из  $C \cdot dU/dt$ , где  $C$  – ёмкость промежутка,  $U$  – напряжение. Прямоугольниками показано время включения каналов ICCD камеры. Длина прямоугольников соответствует длительности экспозиции; в) – осциллограммы импульса тока пучка убегающих электронов (4), а также напряжения при разряде (5) и в режиме холостого хода (6). Отрицательная полярность острия.

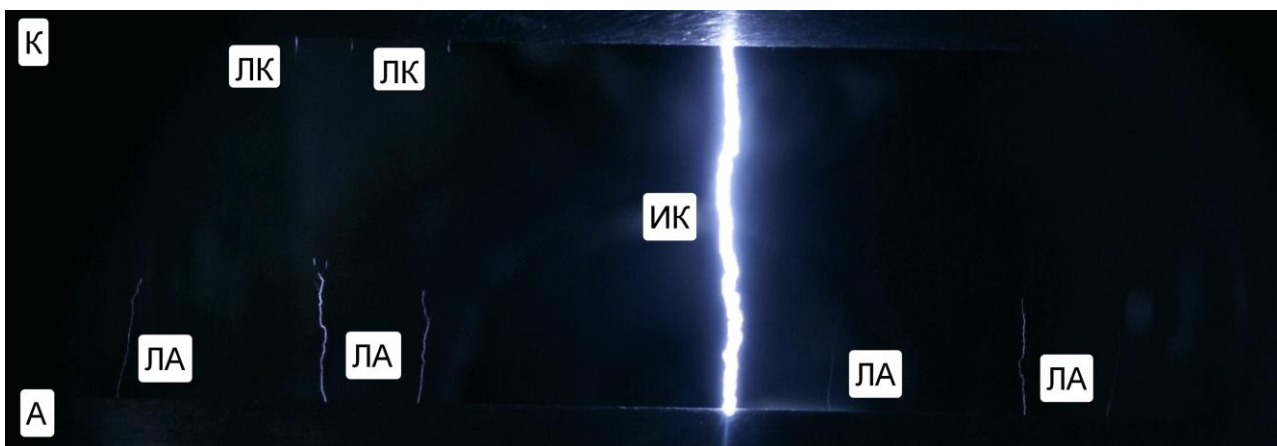


Рис. 4. Фотография разряда в  $SF_6$  при давлении 200 кПа. Установка № 2,  $d = 18$  мм. К – катод, А – анод, ЛК – искровой лидер с катода, ЛА – искровой лидер с анода, ИК – искровой канал.



На фоне диффузного разряда слабой интенсивности видны искровые лидеры, которые распространяются с анода и катода, а также искровой канал, замкнувший промежуток. Для демонстрации этого режима использовался тяжёлый газ  $SF_6$ . Скорость искровых лидеров была больше при их прорастании по направлению к катоду, хотя оба электрода имели одинаковый профиль. Один из лидеров в данных условиях успел замкнуть промежуток, и образовался яркий искровой канал. Появление искровых лидеров влияет на качество лазерного пучка, а искровой пробой приводит к срыву генерации. Поэтому в лазерах режимы разряда, при которых искровые лидеры успевают удалиться от электродов, как правило, не используются. Отметим, что при наносекундной длительности импульсов напряжения, как показывают результаты исследований [22, 29–34], диффузные разряды без искровых лидеров легко реализуются при высоких давлениях различных газов (см. рис. 2).

В работе [29] было показано, что диффузный разряд формируется не только при использовании катода с малым радиусом кривизны, но и анода. При этом поток быстрых и убегающих электронов направлен к аноду и не может осуществлять предьонизацию перед фронтом стримера. Однако форма разряда и его однородность существенно не изменяется. На рис. 5 приведены фотографии свечения промежутка при формировании диффузного разряда и соответствующие им осциллограммы импульсов напряжения и тока через промежуток с анодом в виде иглы.

В экспериментах использовался промежуток острей-плоскость, аналогичный представленному на рис. 3. Импульсы напряжения положительной полярности подавались от генератора ГИН-50-1 ( $U = 15$  кВ,  $\tau_{0,2-0,9} \approx 2,2$  нс,  $\tau_{0,5} \approx 13$  нс). Видно, что у острия также возникает стример шаровой формы, который расширяется по мере его продвижения к катоду (также см. работы [22, 24, 34]). После замыкания стримером промежутка формируется диффузный разряд, диаметр которого постепенно уменьшается. Мы считаем, что формирование диффузного разряда в этих условиях связано с генерацией быстрых электронов у острия и на фронте стримера, которые при торможении на острие и в газе генерируют

характеристическое и тормозное рентгеновское излучение. Рентгеновское излучение распространяется во все стороны и создаёт начальные электроны перед фронтом катоднонаправленного стримера, необходимые для его продвижения.

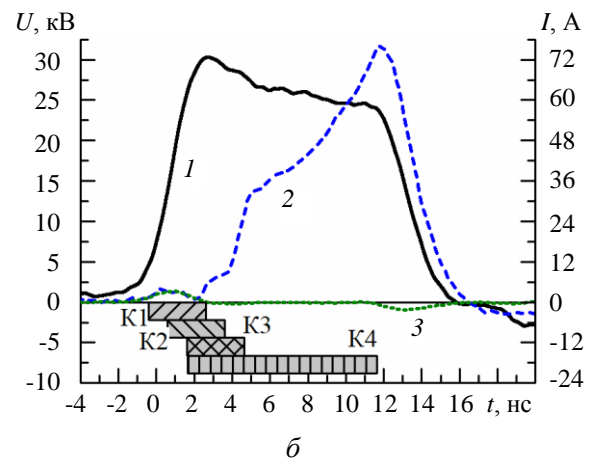
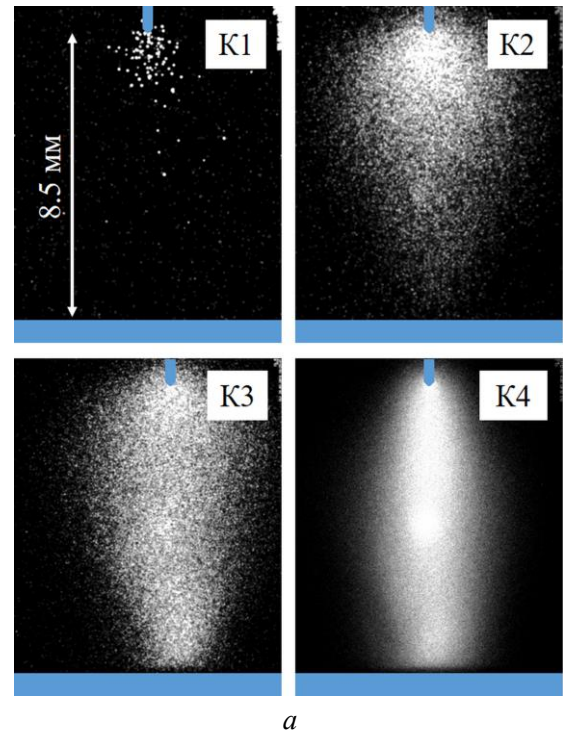


Рис. 5. Диффузный разряд с малым радиусом кривизны анода: а) – ICCD-изображения свечения плазмы в различные моменты времени при разряде в азоте при атмосферном давлении. К1–К4 – каналы ICCD камеры; б) – осциллограммы напряжения (1) и тока разряда (2), а также ток смещения (3) рассчитанный из  $C \times dU/dt$ , где  $C$  – ёмкость промежутка,  $U$  – напряжение. Прямоугольниками показаны включения каналов ICCD камеры. Длина прямоугольников соответствует длительности экспозиции. Положительная полярность.

Поскольку широкие стримеры стартуют и распространяются с электродов, имеющих малый радиус кривизны, причем независимо от их полярности, то между двух электродов с малым радиусом кривизны также формируется диффузный разряд. При прочих равных условиях, диапазон давлений и смесей газов, в которых контрагирование разряда отсутствует, расширяется. Кроме того, при встрече двух волн ионизации, стартующих с электродов в виде лезвий, можно получить дополнительное увеличение электрического поля в середине промежутка. Данный эффект был продемонстрирован в работе [36] при исследовании генерации на второй положительной системе азота. В центре промежутка при увеличении давления азота возникал дополнительный лазерный луч.

В данной работе были проведены подобные эксперименты по получению генерации при встрече двух волн ионизации на установке № 2 с двумя электродами в виде лезвий. На рис. 6 показаны автографы лазерного излучения, полученного на второй положительной и на первой отрицательной системах азота, которые демонстрируют, что при увеличении давления в центре промежутка появляются дополнительные лазерные лучи.

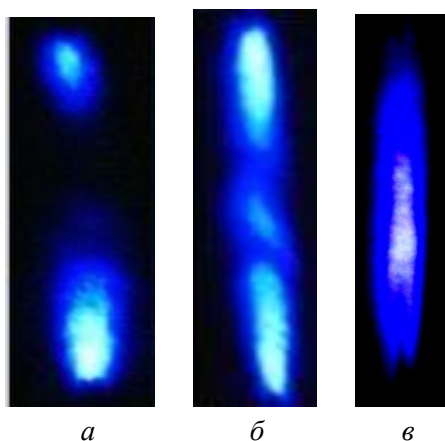


Рис. 6. Автографы лазерного излучения на второй положительной системе азота ( $\lambda = 337,1$  нм) (а, б) и на первой отрицательной ( $\lambda = 428$  нм) (в). Катод вверху. Установка № 2,  $d = 18$  мм. (а) – давление азота 16 кПа, (б) – давление азота 50 кПа, (в) – давление гелия в смеси 300 кПа и азота 0,2 кПа. Интенсивность лазерного излучения на рис. 6, а ослаблена по сравнению с интенсивностью на рис. 6, б.

Электрическое поле сконцентрировано у лезвийных электродов и уменьшается к цен-

тру промежутка, что приводит к исчезновению генерации на второй положительной системе азота в центре промежутка при давлении  $>10$  кПа. Порог генерации при давлениях 10–20 кПа достигается только у электродов, и наблюдаются два лазерных луча (рис. 6, а). Однако при давлении  $\sim 50$  кПа в центре промежутка появлялся третий лазерный луч (рис. 6, б). Это можно объяснить усилением электрического поля в промежутке при встрече двух волн ионизации. При приближении волн ионизации (стримеров, которые движутся параллельно по всей длине лезвийных электродов) за счёт дополнительного усиления электрического поля в центре промежутка порог генерации достигается при высоких давлениях азота. С дальнейшим увеличением давления азота (100 кПа и более) третий луч в центре пропадал из-за уменьшения параметра  $E/N$  ( $E$  – напряженность электрического поля,  $N$  – концентрация молекул азота). Хотя при высоких давлениях азота порог генерации в центре промежутка не достигался, разряд оставался диффузным.

Дополнительный лазерный луч в центре промежутка также был получен на первой отрицательной системе азота ( $\lambda = 428$  нм) при увеличении давления смеси He-N<sub>2</sub> (см. рис. 6, в). Генерация у электродов в этих условиях также сохранялась, но на рис. 6, в два луча у электродов были закрыты дополнительными экранами. Мы планируем использовать этот эффект усиления электрического поля в промежутке для получения ВУФ-генерации в молекулярном водороде.

Проведённые исследования и анализ известных работ показывают, что диффузный разряд успешно используется для накачки лазеров высокого давления. При этом на ряде переходов реализуются удельные мощности и эффективности лазерного излучения [30–32], соответствующие получаемым при накачке объёмным разрядом.

### Объёмные разряды, инициируемые рентгеновским и УФ-излучением

Объёмные разряды, инициируемые рентгеновским и УФ-излучением, широко используются для накачки лазеров различных типов с поперечным возбуждением [1–4, 13–16], в

том числе широкоапертурных [16]. Формирование разряда в таких лазерах обусловлено созданием начальных электронов в рабочей газовой смеси. Из начальных электронов развиваются лавины, головки которых перекрываются до достижения ими критического размера, и лавина не успевает перейти в стример [17]. Для лазеров такого типа важно иметь электродную систему, формирующую однородное электрическое поле в промежутке. Это позволяет реализовывать безыскровые разряды в газах при высоких давлениях. Фотография разрядного промежутка лазера ЛИДА [37], в котором используется накачка поперечным объёмным разрядом, и автограф излучения азотного лазера приведены на рис. 7.

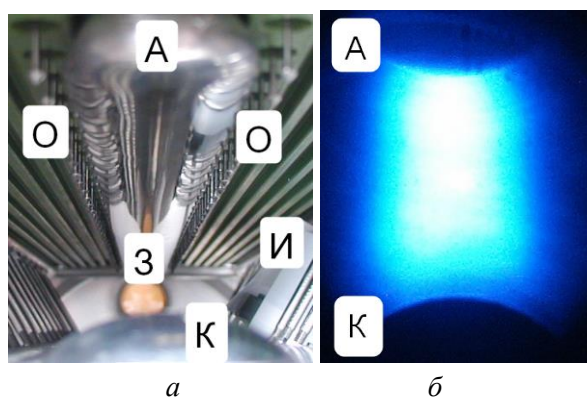


Рис. 7. Лазер с объёмным разрядом: а) – фотография межэлектродного промежутка, сделанная через выходное окно универсального лазера ЛИДА; б) – автограф лазерного излучения в азоте ( $\lambda = 337,1$  нм) при разряде в смеси  $N_2 : NF_3 = 1,6$  кПа :  $0,27$  кПа (б). А – анод, К – катод, О – электроды для предыонизации промежутка с двух сторон анода, И – изолятор на котором крепится анод, З – «глухое» зеркало.

Снимок сделан через выходное зеркало резонатора, изготовленное из кварцевой пластинки. Фотоаппарат помещался ниже центральной оси, поэтому на фотографии внизу виден только торец катода (К), а выше, над зеркалом, видна вся поверхность анода (А). «Глухое» зеркало резонатора (З) расположено над катодом. Справа и слева от катода установлены специальные электроды, образующие искровые промежутки (О) с анодом, которые используются для предыонизации. Анод крепился на изоляторе (И) с профилированной поверхностью. Отметим, что данная система предыонизации обеспечивала подсветку не только УФ, но и рентгеновским излучением [38].

Фотографии объёмного разряда, полученные при генерации в различных смесях в лазере ЛИДА, приведены на рис. 8, а, б.

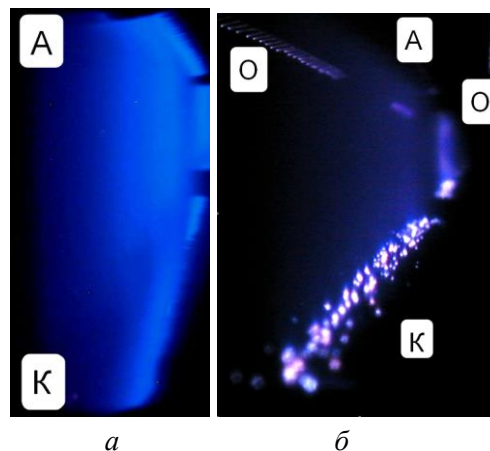


Рис. 8. Фотографии объёмного разряда. а) – смесь  $Ne : Xe : NF_3 = 250$  кПа :  $0,8$  кПа :  $0,2$  кПа; б) – смесь  $SF_6 : H_2 = 3,2$  кПа :  $0,4$  кПа. А – анод, К – катод, О – электроды с параллельными искрами для предыонизации промежутка с двух сторон анода.

В смеси ХеF-лазера (рис. 8, а) при давлении смеси 251 кПа с буферным газом неон однородность свечения разряда было весьма высокой, и яркие пятна на электродах отсутствовали. В рабочей смеси HF-лазера при удельном энергокладе 40 Дж/л (рис. 8, б) на аноде видны яркие пятна, с которых при увеличении удельного энергоклада начинали прорастать искровые лидеры. На катоде при энергокладе 40 Дж/л ярких пятен не было. Слева и справа от анода видно излучение искровых каналов, используемых для предыонизации.

Следует отметить, что при объёмном разряде с уменьшением давления увеличивается длина катодного слоя, в котором ускоряются ионы. Это приводит к различным условиям возбуждения у катода и в промежутке [39]. В частности, при генерации в азоте на смеси  $N_2-NF_3$  это привело при низких давлениях (1,87 кПа) к уменьшению интенсивности лазерного излучения у катода (рис. 7, б). Отметим, что спектры спонтанного излучения объёмных и диффузных разрядов в одинаковых условиях, если не учитывать приэлектродные области, практически совпадали.

Таким образом, объёмный разряд является эффективным способом накачки газовых лазеров. За счет предыонизации промежутка и



специально выбранного профиля электродов на лазерах, описанных в работах [1–4, 14–16, 37, 40], а также на лазере ЛИДА с накачкой объёмным разрядом, была получена эффективная генерация в различных газах и на различных длинах волн.

### **Объёмные разряды, контролируемые или инициируемые электронным пучком**

Для создания широкоапертурных лазеров наиболее часто применяют накачку объёмным разрядом, инициируемым или контролируемым пучком электронов, который формируется в вакуумных диодах. Высокоэнергетические электроны осуществляют предыонизацию промежутка и позволяют получать высокие энергии излучения в  $\text{CO}_2$ -лазерах, в том числе удельные, а также высокие эффективности генерации.

Для накачки применяют два основных режима. В первом размножение электронов за счёт электрического поля незначительно, и ток через разрядный промежуток контролируется пучком электронов. Это позволяет использовать оптимальные значения  $E/N$  для накачки  $\text{CO}_2$ -лазеров. Во втором режиме происходит ионизация газа, и разряд продолжается после окончания тока пучка. В этом режиме формируется катодный слой, который при высоких давлениях имеет малую длину и практически не влияет на распределение плотности энергии излучения по разрядному промежутку. Лазеры с предыонизацией газа пучками электронов подробно исследованы и описаны в большом числе работ, см., например, [1, 3, 7–12, 41].

### **Заключение**

В работе проведено исследование условий формирования и параметров диффузных и объёмных разрядов высокого давления, которые широко используются для накачки в лазерах с поперечным разрядом. Показано, что основные отличия этих разрядов обусловлены механизмом эмиссии электронов с катода, механизмом зажигания разряда (перекрытием головок лавин или формированием широких стримеров), конструкцией электродов и распределением электрического поля в разрядном промежутке.

Объёмные разряды, как известно, обычно формируется за счёт начальных электронов, создаваемых в промежутке жёстким ионизатором (пучок электронов, рентгеновское или УФ-излучение) в электрическом поле, близком к однородному. При этом головки отдельных лавин перекрываются до образования цилиндрических стримеров малого диаметра. Эмиссия электронов с катода после формирования разряда осуществляется преимущественно за счёт ионов, ускоряемых в катодном слое. Объёмный разряд по своим свойствам соответствует аномальному тлеющему разряду. Формирование электродных пятен и распространение с них искровых лидеров приводит к контрагированию объёмных разрядов при увеличении давления и (или) длительности импульса напряжения, а также уменьшению межэлектродного зазора.

Диффузные разряды формируются в резко неоднородном электрическом поле при генерации быстрых и убегающих электронов за счёт широких стримеров, которые стартуют с электрода с малым радиусом кривизны и замыкают промежуток. В начальной стадии формирования разряда с катодом, имеющим малый радиус кривизны, ток в промежутке обусловлен автоэлектронной эмиссией, которая переходит во взрывную, и фотоэмиссией, а также динамическим ёмкостным током [22, 34]. При аноде с малым радиусом кривизны в начальной стадии формирования разряда проводимость промежутка определяется проводимостью плазмы катодонаправленных стримеров, а в остальной части промежутка динамическим ёмкостным током между головкой стримера и катодом. После замыкания промежутка стримерами эмиссия электронов с катода в основном осуществляется с отдельных электродных пятен, нагретых до высокой температуры и сравнительно равномерно распределённых по поверхности электродов. Диффузный разряд по своим свойствам отличается от аномального тлеющего разряда механизмом эмиссии электронов с катода.

---

*Работа выполнена в рамках  
государственного задания ИСЭ СО РАН  
по теме № 13.1.4.*

## ЛИТЕРАТУРА

1. Мак-Даниэль И., Ниген У. (ред.) Газовые лазеры. – М.: Мир, 1986.
2. Баранов В. Ю., Борисов В. М., Степанов Ю. Ю. Электроразрядные эксимерные лазеры на галогенидах инертных газов. – М.: Энергоатомиздат, 1988.
3. Mesyats G. A., Osipov V. V., Tarasenko V. F. Pulsed gas lasers. – Washington: SPIE Press, 1995.
4. Endo I., Walter R. F. Gas lasers. – New York: CRC Press, Taylor and Francis Group, 2007.
5. Месяц Г. А., Бычков Ю. И., Искольдский А. М. // ЖТФ. 1968. Т. 38. № 8. С. 1281.
6. Ковальчук Б. М., Кремнев В. В., Месяц Г. А. // ДАН СССР. 1970. Т. 191. № 1. С. 76.
7. Басов Н. Г., Беленов Э. М., Данилычев В. А., Сучков А. Ф. // Квантовая электроника. 1971. № 3. С. 121.
8. Fenstner C. A., Hufter M. I., Rink I. P., Boyer K. // Bull. Amer. Phys. Soc. 1971. Vol. 16. No. 1. P. 42.
9. Cason S., Dezenberg G. J., Huff R. J. // Applied Physics Letters. 1973. Vol. 23. No. 2. P. 110.
10. Басов Н. Г., Данилычев В. А., Ионин А. А., Ковш И. Б., Соболев В. А., Сучков А. Ф., Урин Б. М. // Квантовая электроника. 1974. Т. 1. № 11. С. 2529.
11. Дацкевич Н. П., Карлова Е. К., Карлов Н. В., Ковальчук Б. М., Конев Ю. Б., Кононов Н. Н., Кочетов И. В., Кузьмин Г. П., Месяц Г. А., Никифоров С. М., Певгов В. Г., Прохоров А. М. // Квантовая электроника. 1977. Т. 4. № 3. С. 457.
12. Аполлонов В. В., Бункин В. Ф., Бычков Ю. И., Коновалов И. Н., Лосев В. Ф., Месяц Г. А., Прохоров А. М., Тарасенко В. Ф., Фирсов К. Н. // Квантовая электроника. 1981. Т. 8. № 6. С. 1331.
13. Dumanchin R., Rocca-Serra J. // C. R. Acad. Sci. (Paris). 1969. Vol. 269B. P. 916.
14. Judd O. P. // Applied Physics Letters. 1973. Vol. 22. No. 3. P. 95.
15. Хомич В. Ю., Ямщиков В. А. // Прикладная физика. 2010. № 6. С. 77.
16. Буранов С. Н., Горохов В. В., Карелин В. И., Павловский А. И., Ретин П. Б. // Квантовая электроника. 1991. Т. 18. № 7. С. 891.
17. Palmer A. I. // Applied Physics Letters. 1974. Vol. 25. No. 3. P. 138.
18. Бабич Л. П., Лойко Т. В., Цукерман В. А. // Успехи физических наук. 1990. Т. 160. № 7. С. 49.
19. Babich L. P. High-Energy Phenomena in Electric Discharges in Dense Gases: Theory, Experiment and Natural Phenomena. – Arlington, VA: Futurepast, 2003.
20. Тарасенко В. Ф., Яковленко С. И. // Успехи физических наук. 2004. Т. 174. № 9. С. 953.
21. Тарасенко В. Ф., Бакирт Е. Х., Бураченко А. Г., Ломаев М. И. // Прикладная физика. 2016. № 4. С. 49.
22. Белоплотов Д. В., Тарасенко В. Ф., Сорокин Д. А., Ломаев М. И. // Письма в Журнал экспериментальной и теоретической физики. 2017. Т. 106. № 10. С. 627.
23. Kunhardt E. E., Byszewski W. W. // Physical Review A. 1980. Vol. 21. No. 6. P. 2069.
24. Тарасенко В. Ф., Найдис Г. В., Белоплотов Д. В., Костыря И. Д., Бабаева Н. Ю. // Физика плазмы. 2018. Т. 44. № 8. С. 652.
25. Алексеев С. Б., Орловский В. М., Тарасенко В. Ф. // Квантовая электроника. 2003. Т. 33. № 11. С. 1059.
26. Noggle R. C., Krider E. P., Wayland J. R. // J. Appl. Phys. 1968. Vol. 39. No. 10. P. 4746.
27. Тарасова Л. В., Худякова Л. Н. // ЖТФ. 1969. Т. 39. № 8. С. 1530.
28. Beaulieu A. J. // Applied Physics Letters. 1970. Vol. 16. No. 12. P. 504.
29. Костыря И. Д., Тарасенко В. Ф. // Известия вузов. Физика. 2004. Т. 47. № 12. С. 85.
30. Панченко А. Н., Тарасенко В. Ф., Панченко Н. А. // Известия высших учебных заведений. Физика. 2017. Т. 60. № 8. С. 36.
31. Panchenko A. N., Tarasenko V. F., Beloplotov D. V., Panchenko N. A., Lomaev M. I. // High voltage. 2018. Vol. 3. No. 4. P. 316.
32. Panchenko A. N., Tarasenko V. F., Lomaev M. I., Panchenko N. A., Suslov A. I. // Optics Communications. 2019. Vol. 430. P. 210.
33. Бакирт Е. Х., Бураченко А. Г., Ломаев М. И., Панченко А. Н., Тарасенко В. Ф. // Квантовая электроника. 2015. Т. 45. № 4. С. 366.
34. Sorokin D. A., Tarasenko V. F., Beloplotov D. V., Lomaev M. I. // Journal of Applied Physics. 2019. Vol. 125. No. 14. 143301.
35. Тарасенко В. Ф., Бакирт Е. Х., Ломаев М. И., Рыбка Д. В., Сорокин Д. А. // Журнал технической физики. 2013. Т. 83. № 8. С. 29.
36. Вильтовский П. О., Ломаев М. И., Панченко А. Н., Панченко Н. А., Рыбка Д. В., Тарасенко В. Ф. // Квантовая электроника. 2013. Т. 43. № 7. С. 605.
37. Бакирт Е. Х., Панченко А. Н., Тарасенко В. Ф. // Квантовая электроника. 2000. Т. 30. № 6. С. 506.
38. Панченко А. Н., Тарасенко В. Ф., Тельминов А. Е. // Квантовая электроника. 2007. Т. 37. № 1. С. 103.
39. Козырев А. В., Панченко А. Н., Тарасенко В. Ф., Тельминов А. Е. // Квантовая электроника. 2008. Т. 38. № 8. С. 731.
40. Тарасенко В. Ф. (ред.) Импульсные лазеры на переходах атомов и молекул. – Томск: STT, 2014.
41. Месяц Г. А., Тарасенко В. Ф. // Квантовая электроника. 2003. Т. 33. № 7. С. 568.

## Diffuse and volume discharges in high pressure gas lasers pumped by transverse discharge (a review)

V. F. Tarasenko, A. N. Panchenko, and D. V. Beloplotov

Institute of High Current Electronics, SB RAS  
2/3 Academicheskoy Ave., Tomsk, 634050, Russia  
E-mail: vft@loi.hcei.tsc.ru; alexei@loi.hcei.tsc.ru;  
rff.qep.bdim@gmail.com

Received October 18, 2019

*Consideration is given to formation of conditions and parameters of diffuse and volume discharges, which are widely used for generation in VUV, UV, visible and IR spectral ranges in different high pressure gases and gas mixtures. It was found that spectral parameters of volume and diffuse discharges are similar. The difference between these discharge modes is found to be associated with the conditions of their formation. The diffuse discharges are formed due to run-away electrons, for what one or both electrodes with a small radius of curvature are used. Whereas uniform electric field between electrodes along with additional preionization of the discharge gap are necessary for a volume discharge formation.*

*Keywords:* diffuse and volume discharge, non-uniform electric field, fast and run-away electrons, streamers, ionization waves, preionization.

### REFERENCES

1. E. W. McDaniel William L. Nighan, *Gas Lasers* (Academic Press, 1982).
2. V. Yu. Baranov, V. M. Borisov, and Yu. Yu. Stepanov, *Electrodischarge excimer lasers on rare gas halides*. (M.: Energoanomizdat, 1988) [in Russian].
3. G. A. Mesyats, V. V. Osipov, and V. F. Tarasenko, *Pulsed gas lasers* (Washington: SPIE Press, 1995).
4. I. Endo and R. F. Walter, *Gas lasers* (New York: CRC Press, Taylor and Francis Group, 2007).
5. G. A. Mesyats, Yu. I. Bychkov, and A. M. Iskol'dskii, *Sov. Phys. Tech. Phys.* **13**, 1051 (1969).
6. B. M. Koval'chuk, V. V. Kremnev, and G. A. Mesyats, *Sov. Phys. Dokl.* **15**, 267 (1970).
7. N. G. Basov, É. M. Belenov, V. A. Danilychev, and A. F. Suchkov, *Soviet Journal of Quantum Electronics* **1**, 306 (1971). <https://doi.org/10.1070%2FQE1971v001n03ABEH003111>
8. C. A. Fenstenmaher, M. I. Hufter, I. P. Rink, and K. Boyer, *Bull. Amer. Phys. Soc. No. 16*, 42. (1971).
9. C. Cason, G. J. Dezenberg, and R. J. Huff, *Applied Physics Letters* **23**, 110 (1973).
10. N. G. Basov, V. A. Danilychev, A. A. Ionin, I. B. Kovsh, V. A. Sobolev, A. F. Suchkov, and B. M. Urin, *Soviet Journal of Quantum Electronics* **4**, 1414 (1975).
11. N. P. Datskevich, E. K. Karlova, N. V. Karlov, B. M. Koval'chuk, Yu. B. Konev, N. N. Kononov, I. V. Kochetov, G. P. Kuz'min, G. A. Mesyats, S. M. Nikiforov, V. G. Pevgov, and A. M. Prokhorov, *Soviet Journal of Quantum Electronics* **7**, 258 (1977).
12. V. V. Apollonov, F. V. Bunkin, Yu. I. Bychkov, I. N. Kononov, V. F. Losev, G. A. Mesyats, A. M. Prokhorov, V. F. Tarasenko, and K. N. Firsov, *Soviet Journal of Quantum Electronics* **11**, 798 (1981).
13. R. Dumanchin and J. Rocca-Serra, *C.R. Acad. Sci. (Paris)* **269B**, 916 (1969).
14. O. P. Judd, *Applied Physics Letters* **22**, 95 (1973).
15. V. Yu. Khomich, and V. A. Yamschikov, *Plasma Physics Reports* **37**, 1145 (2011).
16. S. N. Buranov, V. V. Gorokhov, V. I. Karelin, A. I. Pavlovskii, and P. B. Repin, *Soviet Journal of Quantum Electronics* **21**, 806 (1991).
17. A. I. Palmer, *Applied Physics Letters* **25**, 138 (1974).
18. L. P. Babich, T. V. Loiko, and V. A. Tsukerman, *Sov. Phys. Usp.* **33**, 521 (1990).
19. L. P. Babich, *High-Energy Phenomena in Electric Discharges in Dense Gases: Theory, Experiment and Natural Phenomena*. (Arlington, VA: Futurepast, 2003).
20. V. F. Tarasenko and S. I. Yakovlenko, *Phys. Usp.* **47**, 887 (2004).
21. V. F. Tarasenko, E. Kh. Baksht, A. G. Burachenko, and M. I. Lomaev, *Plasma Physics Reports* **43**, 792 (2017).
22. D. V. Beloplotov, V. F. Tarasenko, D. A. Sorokin, and M. I. Lomaev, *JETP Letters* **106**, 653 (2017).

23. E. E. Kunhardt and W. W. Byszewski, *Physical Review A* **21**, 2069 (1980).
24. V. F. Tarasenko, G. V. Naidis, D. V. Beloplotov, I. D. Kostyrya, and N. Yu. Babaeva, *Plasma Physics Reports* **44**, 746 (2018).
25. S. B. Alekseev, V. M. Orlovskii and V. F. Tarasenko, *Quantum Electronics* **33**, 1059 (2003).
26. R. C. Noggle, E. P. Krider, and J. R. Wayland, *Journal of Applied Physics* **39**, 4746 (1968).
27. L. V. Tarasova and L. N. Khudyakova, *Soviet Physics. Technical Physics* **14**, 1148 (1970).
28. A. J. Beaulieu, *Applied Physics Letters* **16**, 504 (1970).
29. I. D. Kostyrya and V. F. Tarasenko, *Russian Physics Journal* **47**, 1314 (2004).
30. A. N. Panchenko, V. F. Tarasenko, and N. A. Panchenko, *Russian Physics Journal* **60**, 1303 (2017).
31. A. N. Panchenko, V. F. Tarasenko, D. V. Beloplotov, N. A. Panchenko, and M. I. Lomaev, *High voltage* **3**, 316 (2018).
32. A. N. Panchenko, V. F. Tarasenko, M. I. Lomaev, N. A. Panchenko, and A. I. Suslov, *Optics Communications* **430**, 210 (2019).
33. E. Kh. Baksht, A. G. Burachenko, M. I. Lomaev, A. N. Panchenko, and V. F. Tarasenko, *Quantum Electronics* **45**, 366 (2015).
34. D. A. Sorokin, V. F. Tarasenko, D. V. Beloplotov, and M. I. Lomaev, *Journal of Applied Physics* **125**, 143301 (2019).
35. V. F. Tarasenko, E. Kh. Baksht, M. I. Lomaev, D. V. Rybka, and D. A. Sorokin, *Technical Physics* **58**, 1115 (2013).
36. P. O. Vil'tovskii, M. I. Lomaev, A. N. Panchenko, N. A. Panchenko, D. V. Rybka, and V. F. Tarasenko, *Quantum Electronics* **43**, 605 (2013).
37. E. Kh. Baksht, A. N. Panchenko, and V. F. Tarasenko, *Quantum Electronics* **30**, 506 (2000).
38. A. N. Panchenko, V. F. Tarasenko and A. E. Tel'minov, *Quantum Electronics* **37**, 103 (2007).
39. A. V. Kozyrev, A. N. Panchenko, V. F. Tarasenko, and A. E. Tel'minov, *Quantum Electronics* **38**, 731 (2008).
40. *Pulsed gas lasers on transitions of atoms and molecules*. Ed. by V. F. Tarasenko (Tomsk, STT, 2014) [in Russian].
41. G. A. Mesyats and V. F. Tarasenko, *Quantum Electronics* **33**, 568 (2003).