

04;07;12

Мощный разряд с плазменным катодом в плотных газах

© А.Р. Сорокин, В.Н. Ищенко

Институт физики полупроводников СО РАН,
630090 Новосибирск, Россия

(Поступило в Редакцию 18 декабря 1995 г. В окончательной редакции 22 июля 1996 г.)

Предпринята попытка создания электроразрядного источника накачки лазеров на димерах аргона, криптона, ксенона. В основу положен предложенный авторами ранее способ организации разряда, в котором катодное пятно вынесено из области основного разряда, а замыкание разряда на пятно осуществляется по узкому протяженному каналу вспомогательной плазмы. Проведены исследования условий формирования такого разряда. Высокая устойчивость безыскровой стадии разряда позволила впервые осуществить энерговклад на уровне 100 J/cm^2 при давлении $\sim 10 \text{ atm}$, что на несколько порядков выше, чем могут обеспечить традиционные способы. Разработаны разрядная ячейка и система питания многосекционного разряда с активной длиной 200 мм, продемонстрирована надежность всей установки в долговременной эксплуатации.

Введение

Этой работой мы начинаем публикацию результатов исследований, направленных на создание потенциально высокоэффективных электроразрядных лазеров высокого давления на переходах $1,3\Sigma_u^+ - 1\Sigma_g^+$ димеров Ar_2 , Kr_2 , Xe_2 . Основная трудность на этом пути — необходимость обеспечения чрезвычайно высокого энерговклада $\sim 10 \text{ J/cm}^3$ в газ высокого $\sim 10 \text{ atm}$ давления за времена $\sim 10 \text{ ns}$. В таких условиях традиционные методы организации разряда не обеспечивают его устойчивости.

Вопрос об устойчивости разряда был поставлен особенно остро в связи с появлением в 70-х годах электроразрядных лазеров высокого давления. К настоящему времени по этой теме опубликованы сотни работ. При-

чины искрообразования установлены. Основная из них, ограничивающая предельный энерговклад, состоит в следующем. С ростом энерговклада в сильном поле катодного падения потенциала автоэлектронные и взрывные процессы на катоде ведут к образованию катодных пятен. В результате флуктуации эмиссии электронов с катода у одного из пятен формируется высокопроводящий канал, в который затем стягивается ток со всей поверхности катода. Наиболее эффективный по стабилизации разряда электроионизационный способ обеспечивает, например, в сжатом до 10 atm ксеноне энерговклад 0.3 J/cm^3 при мощности 10^7 W/cm^3 , что все же недостаточно для получения генерации [1].

В основу нашего решения задачи положена идея подавления возмущений в прикатодной зоне. Это достигается [2] (рис. 1) вынесением эмиссионного центра, т. е. катодного пятна, причем одного из области, где происходит основной разряд (ОР), и замыканием разряда на пятно по одному протяженному каналу вспомогательной катодной плазмы. В этом случае флуктуации эмиссии в катодном пятне будут относиться ко всему разряду в целом, чем и обеспечивается высокая устойчивость безыскровой фазы разряда. Для предотвращения развития независимых возмущений поперек разряда его ширина должна быть ограничена величиной 1–2 мм.

В работе проведены исследования условий формирования такого разряда, в первую очередь источника катодной плазмы, определяющей развитие в целом. Основная часть опытов выполнена в аргоне и воздухе. Использовался также криптон, ксенон, азот.

Источник вспомогательной катодной плазмы — одноканальный разряд

Катодная плазма должна быть устойчива по отношению к внешним возмущениям. В противном случае местная флуктуация плотности тока в основном разряде (ОР) может привести к появлению неоднородности в самой вспомогательной плазме с дальнейшим формированием искрового канала в ОР.

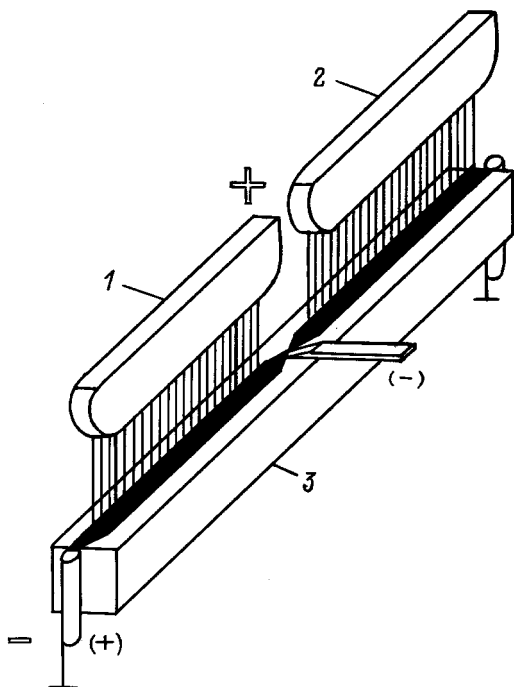


Рис. 1. Разрядный промежуток с двухсекционным анодом (1, 2) и блоком скользящего разряда (3).

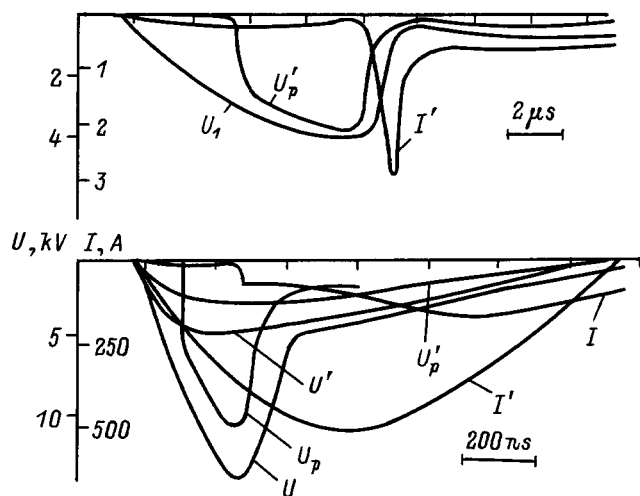


Рис. 2. Осциллограммы напряжения и тока U , I одноканального СР и напряжения U_p на зонде, расположенном посередине между электродами. Штрихами (U' , I' , U'_p) отмечен комбинированный режим возбуждения СР со слабым (вверху) предимпульсом. Напряжение заряда рабочей емкости в обоих случаях (нижние осциллограммы) одинаково. Разряд в аргоне 6 атм.

Поскольку стационарной, а следовательно, и устойчивой формой горения в рассматриваемых условиях является форма искрового разряда, то параметры катодной плазмы должны соответствовать параметрам плазмы искрового разряда. Действительно, переход к искровой форме разряда сопровождается быстрым возрастанием концентрации электронов n_e в канале искры на несколько порядков. Дальнейшая скорость роста n_e до стационарного значения много меньше и даже может слегка падать [3] за счет расширения канала, поэтому плазма в искровом канале значительно меньше подвержена внешним воздействиям.

Таким образом, катодная плазма должна представлять собой однородный, без ветвления, узкий (1–2 мм) протяженный канал с высокой направленностью и с плотностью электронов в ней не меньше, чем в искровом канале.

Задача создания такого канала плазмы не столь проста, как может показаться на первый взгляд. Идеальным был бы, например, канал, сформированный мощным лазерным импульсом (лазерная искра), но такой вариант слишком усложняет установку. Для формирования вспомогательной плазмы был специально разработан [4] одноканальный скользящий разряд (СР) по узкой диэлектрической вставке с проницаемостью ϵ , большей, чем у обкладок $\epsilon > \epsilon_1$. Свойства СР рассмотрим для диэлектрической пары ситалл–стекло ($\epsilon = 1000$, $\epsilon_1 = 10$).

Фазы СР легко проследить по осциллограммам рис. 2. Волна, заряжающая поверхность диэлектрика и создающая плазму малой проводимости, достигает зонда и, как видно, большая часть U падает на оставшемся участке диэлектрика. После достижения волной заземленного

электрода обратный лидер нейтрализует заряд и создает высокопроводящий канал, по которому и завершается СР.

Эксперименты в воздухе и азоте показали высокую направленность СР. При U , близких к напряжению импульсного пробоя промежутка, СР имеет змеевидную в пределах вставки форму. С ростом U канал СР выпрямляется и полностью заполняет поверхность вставки. Появляется видимая, не очень контрастная структура СР в виде "слочки" с "веточками", направленными в сторону заземленного электрода. Влияния такой структуры на стабильность ОР замечено не было.

Разряд в тяжелых инертных газах при малых U подобен разряду в воздухе. Иная картина наблюдается при больших U , когда образуется плазма нужной плотности. Разряд концентрируется по границам раздела диэлектриков, часто перескакивая с одной на другую. Введение скоса поперек блока СР [4], хотя и приводит к стягиванию плазмы к одной границе, полностью не решает задачу. Разряд имеет контрастную волокнистую структуру, которая меняется вдоль разряда и от импульса к импульсу. Это не сказывается на осциллограммах СР и ОР, но проявляется во флуктуациях интенсивности спонтанного излучения ОР. Уменьшение ширины δ вставки до 0.5 мм приводит к случайным выбросам СР на несколько мм от вставки. Отметим, что в воздухе и при $\delta = 0.5$ мм сохранялась четкая направленность СР.

Другая особенность СР с ростом U в инертных газах — появление множества слабо светящихся волокнистых нитей по стеклу. Обычно они ответвляются от основного канала и затем, пройдя несколько мм по стеклу, возвращаются в канал. Их число и интенсивность свечения растут с U и с переходом к более тяжелому инертному газу. Ветвление искажает электрическое поле, что может приводить к нарушению стабильности ОР. Поэтому получить безыскровой ОР в криптоне и ксеноне трудней, чем в аргоне.

Смена полярности питания (плюс на потенциальном электроде) приводит к полной (при малых U) или частичной потере направленности и к большему ветвлению разряда. При колебательном режиме СР направленность полностью определяется параметрами первого полупериода, когда формируется разряд.

Для получения в инертных газах однородного канала плазмы без ветвлений была разработана комбинированная двухимпульсная схема возбуждения СР. Вначале слабый завершённый СР создавал канал слабопроводящей однородной плазмы без ветвлений, а затем включался основной мощный СР, который доводил плазму до требуемой плотности. Как видно, рис. 2 при комбинированном возбуждении СР в 3 раза больший ток достигается не при увеличенном, а при сниженном почти в 3 раза амплитудном значении напряжения на промежутке. Из наших опытов следует, что энерговклад в ОР растёт одновременно с током СР, который в свою очередь ограничен возникновением паразитного искрового пробоя из области СР на основной анод, вызванного

импульсом СР. Снижение рабочего напряжения СР при комбинированном возбуждении благоприятно и с этой точки зрения.

Приведенные свойства одноканального СР могут быть интерпретированы следующим образом. Более высокая концентрация поля E в головках электронных лавин, заряжающих поверхность диэлектрика с большим ε , приводит к началу развития незавершенной стадии СР по вставке. Большой заряд, оседающий в этой стадии на вставке, обеспечивает затем большую проводимость плазмы при нейтрализации заряда обратным лидером, стартовавшим с противоположного электрода в завершающей стадии СР. Однако только эти процессы требуемой направленности СР не обеспечивают. В противном случае она не зависела бы от полярности питания.

На основе работ [5–7] можно показать, что в нашем случае вблизи отрицательного потенциального электрода по границам раздела диэлектриков образуется потенциальный барьер по крайней мере в сотни вольт. Этот скачок потенциала, который по мере продвижения электронных лавин перемещается к заземленному электроду, и обеспечивает высокую направленность СР.

При малых U средняя температура электронов образующейся плазмы, как и в обычном разряде, не превышает нескольких электрон-вольт. Эти электроны легко задерживаются потенциальным барьером, как, впрочем, и более быстрые электроны, число которых невелико. В этих условиях СР четко ограничен размерами вставки. С увеличением U растет число и энергия быстрых электронов и, начиная с некоторого его значения, разряд приобретает многоканальную (волоконистую) структуру с генерацией убегающих электронов [5], которые легко могут преодолеть потенциальный барьер. Наблюдается ветвление разряда в инертных газах. В воздухе переход электронов в режим убегания затруднен, а из-за значительно большего напряжения пробоя по стеклу электроны, преодолевшие барьер, не образуют каналов с достаточной проводимостью. Поэтому ветвление в воздухе отсутствует. Наблюдаемая "елочка" — следствие развития, а затем торможения у границы отдельных электронных лавин. Для комбинированного СР концентрация поля у потенциального электрода недостаточна для появления убегающих электронов, поэтому ветвление СР отсутствует и в инертных газах.

При положительном импульсе разряд также начинается с потенциального электрода и для электронов, которые и обеспечивают проводимость плазмы, вместо потенциальной ямы возникает по пути их движения потенциальная "горка". "Скатываясь" с нее, они нарушают направленность скользящего разряда (СР).

Основной разряд

Длина ОР определяется протяженностью СР. Последняя ограничена величиной напряжения, требуемого для зажигания СР. Необходимо, чтобы за время формирования СР не возник паразитный электрический пробой из

области СР на анод. Для быстрого мощного разряда имеется также проблема с обеспечением малоиндуктивного подвода питания. Поэтому для увеличения длины ОР следует использовать несколько секций такого разряда. В этом случае приобретает важное значение вопрос о синхронизации пробоя в отдельных секциях.

Многосекционный СР в обычном (одноимпульсном) режиме формировался в системе из трех блоков, каждый из которых состоял из двух секций длиной 60 мм (рис. 1). Блоки помещались в камеру из оргстекла, рассчитанную на давление 10 atm. Импульсное напряжение от одного генератора (12 pF) подавалось с помощью коаксиальных кабелей (75Ω) на обостряющие емкости $C = 470$ pF. Для обеспечения электрической развязки между разрядами в отдельных блоках и для подбора одинакового времени их срабатывания последовательно с кабелями включались индуктивности $0.1\text{--}1 \mu\text{H}$. Такая система обеспечивала одновременность зажигания СР с точностью 5 ns.

Для ОР анодные пластины (рис. 1) из никеля толщиной 2 мм высотой 10 мм с активной длиной 35 мм каждая размещались в 6–8 мм от блоков СР. Импульс напряжения с рабочей емкости 2.5 nF заряженной до ≤ 100 kV подавался на анодные пластины посредством отрезков коаксиального кабеля (20Ω , 300 pF/m) длиной 70 см, число которых (1–3) можно было менять, меняя тем самым импеданс подводящей линии. Параллельно разрядному промежутку могли быть дополнительно подключены обостряющие емкости.

Схема питания в целом обеспечивала одновременное зажигание ОР во всех секциях с точностью ~ 1 ns.

Разряд сохранял однородность и непосредственно в воздухе атмосферного давления, где, как известно, при других способах возбуждения разряд контрагируется за времена ~ 1 ns. Отсутствие вакуумной откачки, легкая доступность как к элементам разрядного промежутка, так и к блоку СР, простота монтажа — все это позволило установить основные свойства ОР на примере разряда в воздухе.

Эксперименты показали, что наибольший без искрообразования вклад энергии и мощности в активный объем можно обеспечить, если ОР зажигать в момент достижения наибольшего тока в СР. Небольшая критичность к моменту включения ОР (при длительности тока СР 300 в пределах $t_4 - t_1 = 200$ ns на рис. 3 вблизи максимума) в сочетании с высокой стабильностью задержки между появлением импульса напряжения и тока в ОР и позволяет легко осуществить синхронизацию нескольких таких разрядов.

Предельная энергия, вкладываемая в ОР, линейно растет с током СР. Рост стабильности ОР, по-видимому, связан как с возрастанием УФ предыонизации, которая уменьшает вероятность зарождения неустойчивости непосредственно внутри активного объема, так и с более стабильным состоянием катодной плазмы при больших токах СР.

В условиях рис. 3 энергия и пиковая мощность, вложенные в ОР, соответственно равны 1.8 J и $1.27 \cdot 10^8$ W.

Заметная часть этой энергии рассеивается в плазме СР. Предполагается линейный характер нарастания тока ОР в плазме СР по направлению к металлическому катоду, а также считая распределение напряженности электрического поля вдоль плазмы СР однородным, для оценки потерь мощности можно получить $0.5I_0U$. В максимуме I_0 (на рис. 3) потери составят 15%.

В воздухе получен энерговыклад 8 J/cm^3 при мощности $6 \cdot 10^8 \text{ W/cm}^3$.

Несколько других условий требует разряд в аргоне. Хотя безыскровой разряд можно было получить и при его включении в максимуме тока СР, наилучшая стабильность ОР достигается в более позднее время включения t_0 (рис 4), когда, по-видимому, релаксирующая плазма становится более однородной.

Предельный энерговыклад ограничивался параметрами источника питания и составил, как можно оценить по рис. 4, 20 J/cm^3 при мощности 10^9 W/cm^3 . Момент пробоя (заметный рост тока) зависит от величины тока СР, момента включения ОР t_0 , давления и может быть как на фронте U_0 , так и на его вершине.

Меньший энерговыклад достигнут в криптоне и ксено-не — несколько J/cm^3 при мощности $\sim 10^8 \text{ W/cm}^3$. На наш взгляд, это связано только с большим ветвлением и неоднородностью СР. Переход к комбинированному режиму СР показал лучшую стабильность ОР в аргоне. С криптоном и ксеноном этот режим не испытывался.

С целью выяснения возможности дальнейшего увеличения энерговыклада были проведены опыты с малым объемом возбуждения $2 \times 2 \times 10 = 40 \text{ mm}$. В аргоне

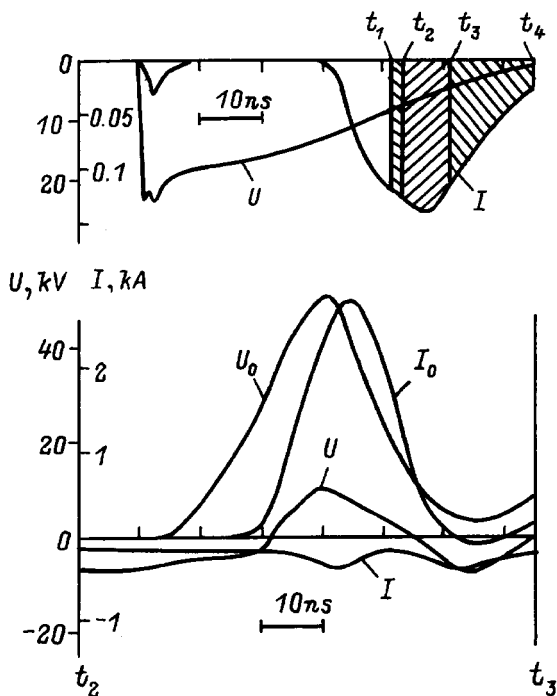


Рис. 3. Осциллограммы напряжения и тока U, I для СР и U_0, I_0 для ОР. Верхняя — без ОР, нижняя — с ОР. Разряд в воздухе при атмосферном давлении, длина СР 70 mm, возбуждаемый объем $5 \times 1 \times 0.2 \text{ cm}$.

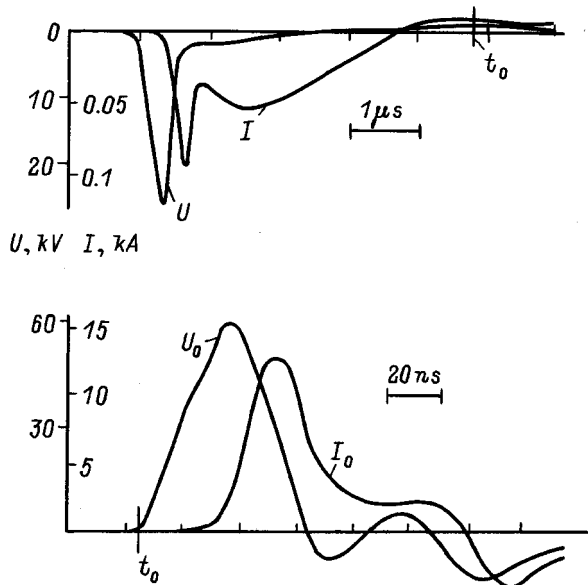


Рис. 4. Осциллограммы, иллюстрирующие разряд в аргоне (10 atm). Длина СР 60 mm, возбуждаемый объем $3.5 \times 0.8 \times 0.15 \text{ cm}$, t_0 — момент включения ОР.

получен энерговыклад 200 J/cm^3 при пиковой мощности $8 \cdot 10^9 \text{ W/cm}^3$. В воздухе в этих условиях разряд контрагировался, но у плазменного катода имелся участок высотой 1–2 mm, где разряд сохранялся диффузным. Возможно, неоднородность зарождалась у анода или возникла при переплюсовании напряжения на ОР.

Заключение

В работе проведены исследования условий формирования мощного безыскрового разряда в плотных газах по способу, описанному в [2]. Показано, что они в основном определяются параметрами вспомогательной катодной плазмы. Приведены свойства и механизм возникновения высокой направленности скользящего разряда с одним каналом [4], который использовался как источник катодной плазмы. Предложен комбинированный скользящий разряд с улучшенными параметрами плазмы.

Продемонстрирована высокая устойчивость разряда, которая позволила осуществить энерговыклад на уровне 100 J/cm^3 при давлении на несколько порядков выше, чем могут обеспечить традиционные способы при таких давлениях. Проведенные опыты подтверждают, что достигнутые ранее предельные энерговыклады были ограничены зарождением неоднородности в прикатодной области.

На основе исследований разработана разрядная ячейка и система питания многосекционного разряда с активной длиной 210 mm. При необходимости длина может быть увеличена. Установка в целом обеспечивала одновременность зажигания разряда в секциях с точностью $\sim 1 \text{ ns}$ и оказалась надежной в эксплуатации, что свидетельствует о перспективности использования такого разряда в лазерах высокого давления. На установке был выполнен цикл

исследований спектральных и временных характеристик спонтанного излучения и измерены коэффициенты усиления (поглощения) на работах переходов димеров. Эти результаты будут опубликованы в последующей нашей работе.

Исследования проведены в рамках выполнения проекта (№ 95-02-05358а) создания электроразрядных лазеров на димерах инертных атомов по гранту РФФИ.

Список литературы

- [1] Басов Н.Г., Данилычев В.А., Долгих В.А. и др. // Квантовая электроника. 1975. Т. 2. № 1. С. 28–36.
- [2] Сорокин А.Р. // Письма в ЖТФ. 1985. Т. 11. Вып. 22. С. 1378–1382.
- [3] Королев Ю.Д., Месяц Г.А. Автоэмиссионные и взрывные процессы в газовом разряде. Новосибирск: Наука, 1982. С. 256.
- [4] Сорокин А.Р. // Письма в ЖТФ. 1987. Т. 13. Вып. 2. С. 94–98.
- [5] Дашук П.Н., Чистов Е.К. // ЖТФ. 1979. Т. 49. Вып. 6. С. 1241–1244.
- [6] Дашук П.Н., Мазец С.К., Павлов С.К. и др. // Письма в ЖТФ. 1982. Т. 8. Вып. 19. С. 1153–1156.
- [7] Лебедев Н.Н. // ЖТФ. 1958. Т. 28. Вып. 6. С. 1330–1337.