

04;07;09;12

Особенности развития импульсных СВЧ разрядов в квазиоптическом пучке в различных газах

© Л.П. Грачев, И.И. Есаков, К.В. Ходатаев

Московский радиотехнический институт РАН, 113519 Москва, Россия

Поступило в Редакцию 8 января 1997 г.

Приводятся фотографии импульсных СВЧ разрядов инициированных металлическим шаром, помещенным в фокус квазиоптического электромагнитного пучка с линейной поляризацией поля в воздухе, элегазе, водороде и гелии при давлении в несколько сотен Торг. Отмечаются общие черты в этих газах и их характерные особенности.

Введение

Импульсный газовый СВЧ разряд в сфокусированный СВЧ *ТЕМ*-волне в своем развитии может проходить такие последовательные этапы, как диффузный, ионизационно-перегревный, стримерный, резонансный и кумулятивный [1]. При фиксированной длительности разряда t_p с ростом давления p газа и амплитуды электрической компоненты исходного СВЧ поля E_0 их последовательность не меняется, а конкретное количество увеличивается. Последний из реализующихся к моменту окончания СВЧ импульса этап в значительной степени определяет внешний вид развившегося плазмоида. В этом смысле можно говорить о форме разряда: диффузной, ионизационно-перегревной, стримерной и т.д. [2].

Основные физические факторы, определяющие свойства разряда на каждом из перечисленных этапов, не зависят от сорта газа. Однако при качественном совпадении общей картины развития разрядов в различных газах ее конкретные детали могут и не совпадать [3,4]. Индивидуальные особенности обуславливаются, например, количественными различиями в уровне пробойного поля E_{dis} , в значениях кинетических коэффициентов, в наличии или отсутствии ионизирующего ультрафиолетового излучения из области разряда и т.п.

Эксперименты [1,5] показали, что в принципиальном плане нет существенных различий между безэлектродными и инициированными разрядами. В то же время применение инициатора, особенно при высоких p , позволяет существенно расширить диапазон варьирования E_0 . Кроме того, применение в качестве инициатора, например, металлического шарика позволяет проводить оперативную калибровку абсолютного уровня поля по методике, изложенной в [6].

В настоящей работе для пополнения сведений о СВЧ разрядах в различных газах приводятся фотографии инициированных шаром импульсных СВЧ разрядов в сфокусированной бегущей электромагнитной волне в воздухе, элегазе SF_6 , водороде H_2 и гелии He при p в сотни Торг. Отмечаются их общие черты и различия. Среди перечисленных газов воздух и SF_6 являются электроотрицательными, причем коэффициент прилипания электронов в SF_6 существенно больше, чем в воздухе.

Состав молекул у этих газов более сложен, чем у H_2 , а He вообще является атомарным газом. Таким образом, спектр отличий исследуемых газов достаточно широк.

Условия эксперимента

В опытах использовалось импульсное с прямоугольной огибающей *ТЕМ*-излучение с линейной поляризацией и длиной волны 8.5 см [5]. В области фокуса в плоскости, перпендикулярной вектору Пойнтинга Π , поле имело примерно гаусово распределение с характерным масштабом в несколько сантиметров. Вдоль Π оно было однородно также на длине в несколько сантиметров. Максимальная величина E_0 была около 6.5 кВ/см. СВЧ импульс имел длительность 40 μs . Паузы между импульсами были не менее минуты.

В фокус пучка симметрично его оси помещалась герметичная кварцевая труба с плоскими торцами из оптически прозрачного стекла. Труба имела внутренний диаметр 8 см, толщину стенки 0,4 см и длину 50 см. Ее ось была перпендикулярна Π и E_0 . Труба, предварительно откачанная до 10^{-1} Торг, заполнялась исследуемым газом, p которого фиксировалось с точностью ± 0.75 Торг. Трубу окружал воздух при атмосферном давлении.

В трубе в фокусе электромагнитного пучка помещался свинцовый шарик диаметром 0.25 см на леске толщиной 10^{-2} см. Она натягивалась по диагонали центрального, перпендикулярного E_0 сечения трубы. Поверхность шара являлась источником инициирующих электронов. Для этого она освещалась ультрафиолетовым (УФ) излучением длительностью 10 μs . В экспериментах момент пробоя исследуемых газов совпадал с началом УФ импульса. Сдвигая его, можно было менять время разряда t_p , длящееся от начала импульса УФ подсветки до окончания СВЧ импульса.

Величины E_0 и t_p подбирались таким образом, чтобы разряд, начавшись на шаре, не доходил до внутренней поверхности трубы.

Разряд фотографировался через торец трубы. Время экспозиции превышало t_p . На нижеприведенных фотографиях E_0 вертикален, а Π направлен справа налево. На них диаметр шара является геометрическим масштабом. На всех изображениях $t_p = 10 \mu s$.

Результаты наблюдений

На рис. 1 приведен разряд в воздухе при 300 Торг и $E_0 = 6.5 \text{ kV/cm}$. Видно, что это — типичный стримерный разряд, реализующийся в СВЧ диапазоне [5]. Отдельные участки основных стримеров и их концы "оперены" тонкими короткими плазменными каналами со слабым диффузным ореолом.

При этом давлении воздух не пробивался при $E_0 < 5.7 \text{ kV/cm}$ (разряд для 300 Торг и $E_0 = 5.7 \text{ kV/cm} \approx E_{\text{dis}}$ приведен на рис. 2). Следовательно, в опыте $E_{\text{dis}} \approx 1/3 E_k$, где $E_k = 40p$ — так называемое критическое поле пробоя (здесь и в дальнейшем в аналогичных формулах p выражено в Торг, а E_k — V/cm). Напомним, что на полюсах шара, где E_0 перпендикулярна его поверхности, поле равно $3E_0$. Измеренное E_{dis} всего на 17% выше ее значения, следующего из теории [6]. Таким образом, наличие

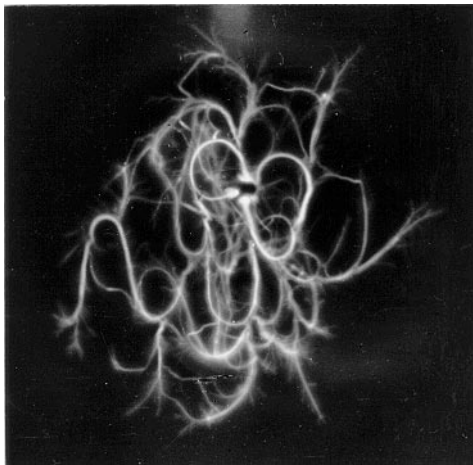


Рис. 1. СВЧ разряд в воздухе при $p = 300$ Торг и $E_0 = 6.5 \text{ kV/cm}$.

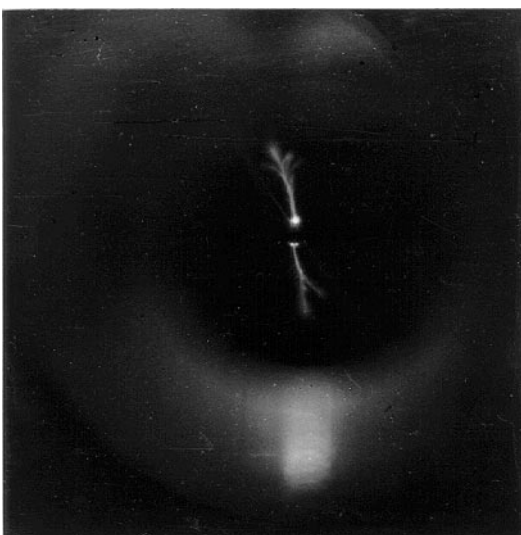


Рис. 2. СВЧ разряд в воздухе при $p = 300$ Торг и $E_0 = 5.7 \text{ kV/cm}$.

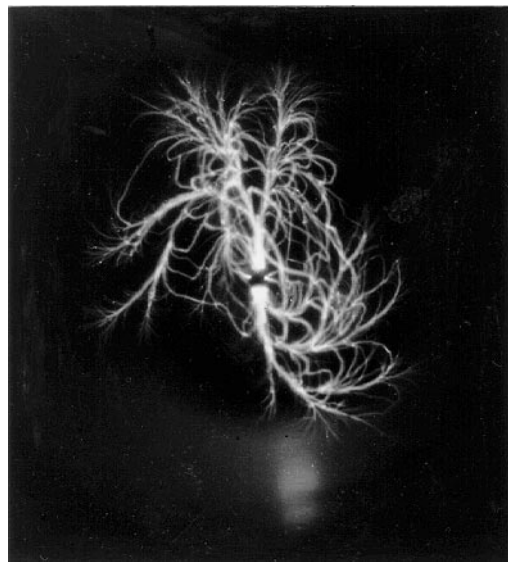


Рис. 3. СВЧ разряд в элегазе при $p = 90$ Торг и $E_0 = 5 \text{ kV/cm}$.

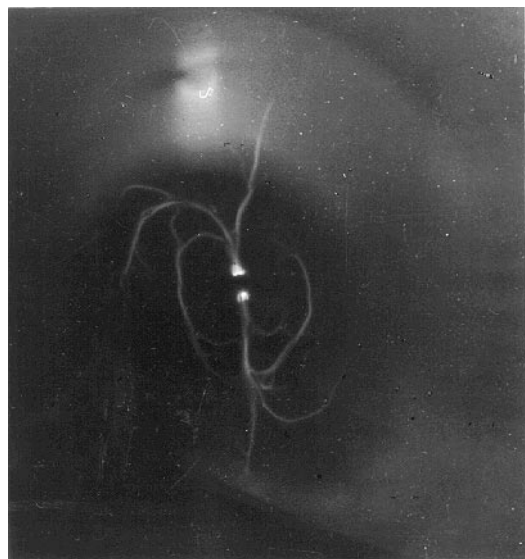


Рис. 4. СВЧ разряд в водороде при $p = 300$ Торг и $E_0 = 5 \text{ kV/cm}$.

трубы в фокусе электромагнитного пучка практически не исказило ни структуру, ни величину исходного поля.

На рис. 3 показан разряд в SF_6 при 90 Торг и $E_0 = 5 \text{ kV/cm}$. Видно, что он также стримерный. Каналы оперения длиннее, чем у разрядов в воздухе. Это создает впечатление большей объемной плотности разрядных каналов. Их диффузная шуба выражена слабее, чем в воздухе. Наличие большого количества сравнительно длинных каналов оперения является основной отличительной чертой разрядов в SF_6 .

При $E_0 = 5 \text{ kV/cm}$ SF_6 пробивался только при $p \leq 105$ Торг, что соответствует $E_k = 150p$. Эта величина примерно на 30% больше обычно приводимых

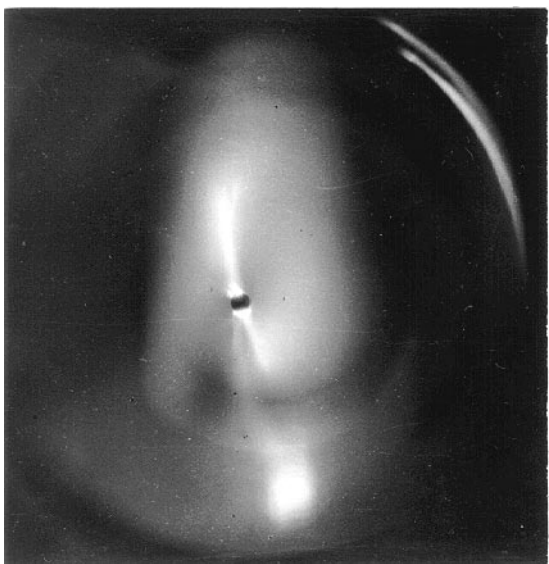


Рис. 5. СВЧ разряд в гелии при $p = 300$ Торг и $E_0 = 4.4$ кВ/см.



Рис. 6. СВЧ разряд в гелии при $p = 760$ Торг и $E_0 = 5.5$ кВ/см.

в справочниках значений E_k для элегаза. Например, в [7] дается $E_k = 100p$, а в [8] — $117p$.

На рис. 4 представлен разряд в H_2 при 300 Торг и $E_0 = 5$ кВ/см. В этих условиях разряд в водороде также стримерный. У разрядных каналов практически полностью отсутствует как стримерное оперение, так и диффузная шуба, что создает впечатление их разреженности. Отсутствие мелких деталей у разряда в H_2 является его основной внешней особенностью.

При $p = 300$ Торг H_2 пробивается только при $E_0 \geq 4.4$ кВ/см, т.е. $(E_0/p)_{dis} \approx 15p$, а при $p = 660$ Торг — только при 6.5 кВ/см, что дает $(E_0/p)_{dis} \approx 10p$. Последняя величина совпадает со значением $(E_0/p)_{dis}$ в однородном поле, приводимым, например, в [8,9]. Можно предположить, что в рассматриваемой экспериментальной установке функция шара заключается только в обеспечении наличия иницилирующих пробой электронов, а область утроенного поля на его полюсах легко диффундирующие в H_2 электроны просто "не замечают". Кроме того, в водороде даже при p в сотни Торг при расчете пробойных полей нужно уже учитывать и неоднородность СВЧ пучка с характерным масштабом в несколько см. Именно с этим связан фиксируемый в опыте рост $(E_0/p)_{dis}$ с падением p .

И наконец, на рис. 5 приведен разряд в He при 300 Торг и $E_0 = 4.4$ кВ/см. Видно, что при данных условиях разряд в He реализуется практически еще в диффузной форме. При увеличении E_0 до E_{max} с этим p разряд принимает ионизационно-перегревную форму и все еще не становится стримерным. Этот результат подтверждает выводы работы [4], в которой указывается о реализации стримерного разряда в He только при $p \geq 500$ Торг. И действительно, на рис. 6 показан разряд в He при 760 Торг и $E_0 = 5.5$ кВ/см. На нем видно, что

это — уже стримерный разряд, хотя еще с существенным диффузным фоном, на котором лишь намечаются каналы оперения.

В условиях эксперимента с $p = 300$ Торг He пробивается при $E_0 \geq 4.4$ кВ/см, т.е. $(E_0/p)_{dis} = 15$, а с 760 Торг при 5.5 кВ/см $(E_0/p)_{dis} = 7$. Согласно работе [8], $(E_0/p)_{dis} = 3$, [4] — 4.7 и [9] — 1–3. Следовательно, в He, так же как и в H_2 , диффузия электронов играет существенную роль при оценке пробойных полей в пространственно неоднородных условиях.

Выводы

Таким образом, СВЧ разряды в сфокусированном электромагнитном *TEM*-пучке в воздухе, SF_6 , H_2 и He при давлениях в сотни Торг в основных чертах подобны. В то же время в электроотрицательных газах (в воздухе и SF_6) разряды принимают стримерную форму уже при относительно низких p (до 100 Торг), а, например, в He — лишь при $p > 500$ Торг. Существенным различием стримерной формы разрядов в различных газах является наличие или отсутствие у них сравнительно мелкомасштабной стримерной структуры, выступающей в качестве оперения основных разрядных каналов. Так, если в H_2 она практически отсутствует, то в He уже видны ее зачатки. Мелкомасштабная стримерная структура более выпукло выступает в воздухе, а в SF_6 она в значительной степени определяет весь внешний вид разряда. У He при p , близких к атмосферному, все еще существенны диффузный фон и диффузный ореол вокруг стримерных каналов, который, например, в H_2 отсутствует уже при $p \approx 300$ Торг.

Эксперимент показал, что для SF_6 значение $E_k = 150p$ [Торг]; V/cm. Оно выше этого значения, приводимого в справочниках.

Полученные в опытах величины $(E_0/p)_{dis}$ в H_2 и He могут быть использованы в качестве сопоставления при построении теории СВЧ пробоя этих газов с учетом диффузионных явлений в пространственно неоднородных Гаусовых пучках.

Список литературы

- [1] Грачев Л.П., Есаков И.И., Мишин Г.И., Ходатаев К.В. // ЖТФ. 1996. Т. 66. Вып. 7. С. 32–45.
- [2] Грачев Л.П., Есаков И.И., Мишин Г.И., Федотов А.Б. // ЖТФ. 1989. Т. 59. Вып. 10. С. 149–154.
- [3] Вихарев А.Л., Горбачев А.М., Ким А.В., Колыско А.Л. // Физика плазмы. 1992. Т. 18. № 8. С. 1068–1075.
- [4] Бровкин В.Г., Колесниченко Ю.Ф., Хмара Д.В. // Шаровая молния в лаборатории. М.: Химия, 1994.
- [5] Грачев Л.П., Есаков И.И., Мишин Г.И., Ходатаев К.В. // ЖТФ. 1994. Т. 64. Вып. 1. С. 74–88.
- [6] Грачев Л.П., Есаков И.И., Ходатаев К.В., Цыленков В.В. // Физика плазмы. 1992. Т. 18. Вып. 3. С. 411–415.
- [7] Курлин М.В., Панова Я.И., Пасынков В.В., Таиров В.Н. Электрорадиоматериалы. Л.: Судостроение, 1969. 343 с.
- [8] Райзер Ю.П. Физика газового разряда. М.: Наука, 1987. 592 с.
- [9] Мак-Дональд А. Сверхвысокочастотный пробой в газах. М.: Мир, 1969. 206 с.