

03;04;09

Диапазон существования самостоятельно развивающегося подкритического стримерного СВЧ разряда

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

Московский радиотехнический институт РАН,
113519 Москва, Россия

(Поступило в Редакцию 9 февраля 1998 г. В окончательной редакции 30 января 1999 г.)

Приводятся данные исследования подкритического стримерного СВЧ разряда в воздухе в электромагнитном пучке. Показано, что в зависимости от степени подкритичности такой разряд может реализоваться в двух формах: самостоятельно развивающегося и привязанного к инициатору. Определен диапазон подкритичности исходного поля в зависимости от давления воздуха, в котором реализуется самостоятельно развивающийся разряд.

В работе [1] предложено использовать для очистки атмосферы Земли от разрушающих ее озоновый слой фреонов подкритический стримерный СВЧ разряд. Предполагается, что разряд осуществляется в формируемом наземной антенной электромагнитном (ЭМ) пучке. Первоначально на заданной высоте над поверхностью Земли он зажигается на системе иницирующих вибраторов, а затем непрерывно поддерживается ЭМ излучением. Использование ЭМ пучка с уровнем поля, существенно меньшим критического, характеризующего порог самостоятельного пробоя воздуха при заданном давлении, позволяет снизить уровень СВЧ мощности, излучаемой антенной, до практически реализуемой величины. Применение же именно стримерной формы СВЧ разряда дает возможность ограничиться лишь небольшим числом начальных иницирующих вибраторов. При этом используется свойство такого разряда отрываться от инициатора и в дальнейшем непрерывно самостоятельно развиваться в подкритическом поле в виде прорастающих и ветвящихся стримерных каналов. В то же время, как отмечено в [1], в настоящее время минимальный уровень внешнего поля, при котором разряд отрывается от инициатора и развивается самостоятельно, неизвестен. А знать его очень важно. Может оказаться, например, что именно он задаст требование к СВЧ мощности, излучаемой антенной, при реализации данного способа очистки атмосферы.

В настоящей работе приводятся результаты экспериментов по определению нижней по полю границы существования самостоятельно развивающегося подкритического СВЧ разряда в зависимости от давления воздуха.

Опыты проводились на установке, подробно описанной в работе [1]. Линейно поляризованное ЭМ излучение с длиной волны поля $\lambda = 8.5$ см и длительностью импульса $\tau = 40$ мкс фокусировалось в центре герметичной камеры. Характерный размер фокусного пятна был около нескольких сантиметров. Амплитуда электрической компоненты исходного поля в фокусе варьировалась от $E_0 = 0.95$ до 2 KV/cm и устанавливалась с точностью не хуже 10%. Эксперименты проводились в режиме

одиночных СВЧ импульсов. Паузы между ними были не менее 1 min. Давление воздуха p в камере могло меняться от десятков Торг до атмосферного и измерялось с точностью ± 1.5 Торг. В фокус параллельно E_0 помещался иницирующий вибратор. Он выполнялся из медного провода диаметром $2a = 0.8$ mm и длиной $2L$, равной 2 или 3 см.

В опытах разрядная область фотографировалась с временем экспозиции $t_e \gg \tau$. На нижеприведенных фотографиях излучение поступает справа налево, а E_0 вертикален. Размеры инициаторов могут служить масштабом изображения.

Результаты экспериментов для каждой указанной длины иницирующего вибратора представлены на рис. 1 и 2 в виде матриц из фотографий, столбцы которых соответствуют конкретному давлению p , а строки — определенной амплитуде ЭМ поля E_0 . Фотографии, приведенные на рис. 1, соответствуют $2L = 2$ см, $p = 60, 100, 150, 200$ и 400 Торг и $E_0 = 0.95, 1.2, 1.4, 1.6, 1.8$ и 2 KV/cm. Максимальная величина p ограничена возможностью пробоя воздуха с данным вибратором при максимально используемом в опытах уровне E_0 (при $E_0 = 2$ KV/cm и $p > 400$ Торг с этим вибратором воздух не пробивался). Фотографии, приведенные на рис. 2, сняты при $2L = 3$ см. В данную матрицу кроме столбцов и строк, аналогичных матрице на рис. 1, включен уже столбец с $p = 760$ Торг.

При анализе экспериментальных результатов удобно ввести понятие степени подкритичности исходного поля $\Psi = E_k/E_0$, где критическое поле пробоя $E_k = 40p$; V/cm — если p в нем выражено в Торг. Из рис. 1 и 2 видно, что при малых и больших степенях подкритичности вид разряда существенно отличается. При малых Ψ это достаточно широко описанный стримерный подкритический разряд [2,3]. Для примера на рис. 3 приведена в большем масштабе, чем на рис. 2, фотография такого разряда, соответствующая $p = 150$ Торг и $E_0 = 2$ KV/cm, т.е. $\Psi = 3$. Это — типичный клубок плазменных каналов. Его протяженность навстречу излучению примерно равна 5 см, что соответствует средней скорости распространения фронта разряда $V_{fr} = 1.25 \cdot 10^5$ cm/s или

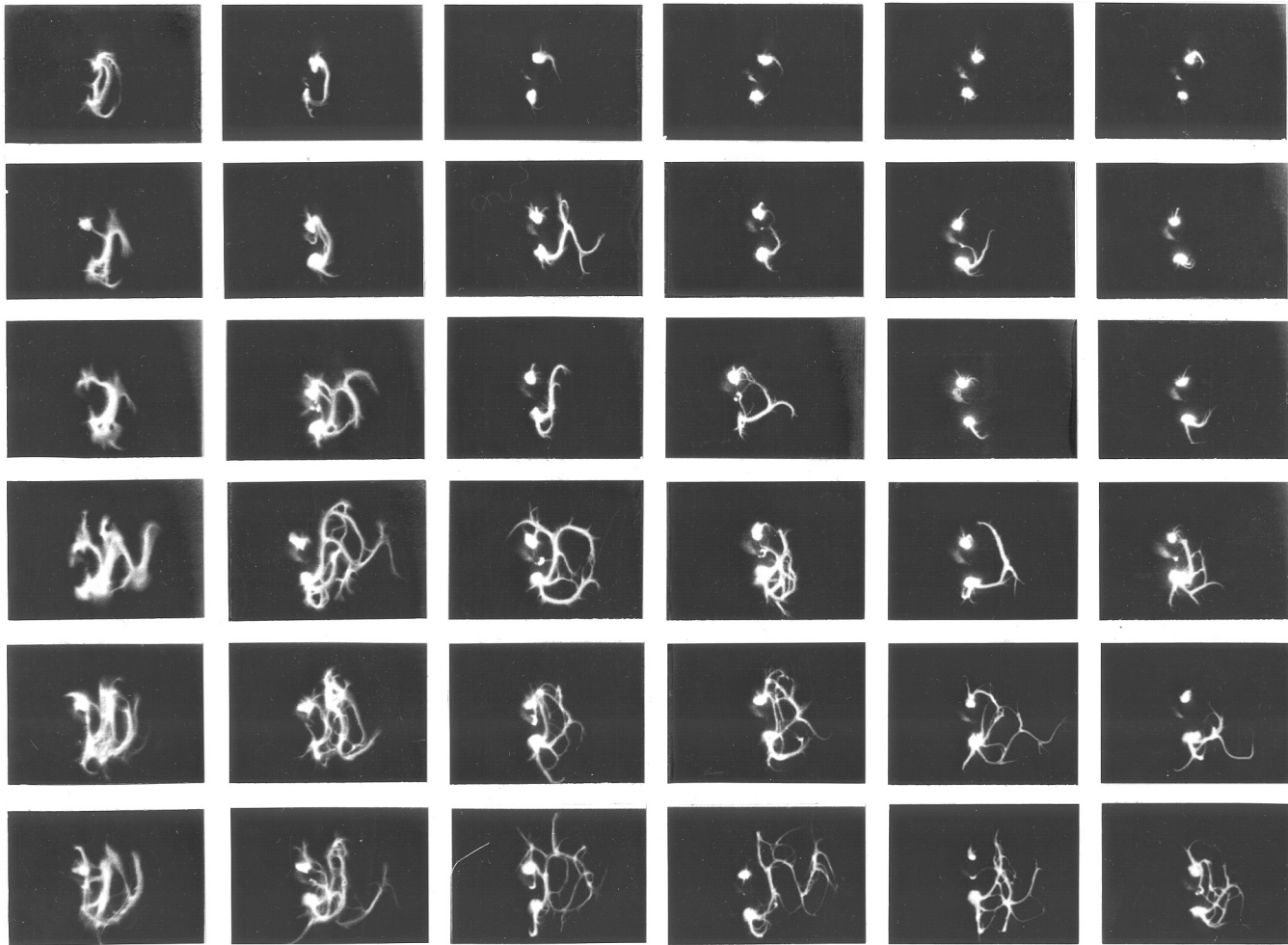


Рис. 1. Внешний вид инициированного подкритического СВЧ разряда при различных давлениях воздуха и амплитудах поля: $2L = 2 \text{ cm}$, $2a = 8 \cdot 10^{-2} \text{ cm}$.

средней скорости роста составляющих его стримерных каналов $V_{\text{str}} = 2.2 \cdot 10^5 \text{ cm/s}$ [4].

При больших Ψ характер разряда существенно меняется. Для примера на рис. 2 в сравнительно большем масштабе, чем на рис. 4, приведена фотография, соответствующая $p = 150 \text{ Torr}$ и $E_0 = 0.95 \text{ KV/cm}$, т.е. $\Psi = 6.3$. На ней видно, что от полюсов вибратора отходят стримерные каналы, но в течение всего СВЧ импульса они продолжают оставаться как бы привязанными к ним. Внешне это уже совершенно другой тип СВЧ разряда. В дальнейшем будем называть его привязанным подкритическим стримерным СВЧ разрядом.

По рис. 1 и 2 может быть определена граница по E_0 или Ψ перехода от самостоятельно развивающегося подкритического разряда к привязанному в зависимости от давления воздуха. Сначала сформулируем критерий, которым мы будем руководствоваться при определении этой границы. Здесь основная сложность заключается в ограниченных возможностях экспериментальной установки: малой длительности СВЧ импульса и небольшом

объеме фокусной области с относительно однородным полем. В условиях эксперимента даже самостоятельно развивающийся разряд не успевает отойти от инициатора достаточно далеко. Кроме того, как следует из рис. 1 и 2, с уменьшением E_0 уменьшается и "густота" стримерных каналов, что связано с уменьшением размеров области ЭМ пучка, в которой может реализоваться такая форма разряда. Эти трудности усугубляются свойством самого стримерного СВЧ разряда формировать сложную пространственную конфигурацию, не повторяющуюся в различных СВЧ импульсах. В связи с этим при фотографировании разрядной области с одного ракурса даже при малом числе стримерных каналов не всегда удается определить форму и длину каждого из них (получение же большого числа опытных реализаций делает эксперимент весьма трудоемким).

Для выработки критерия воспользуемся данными, приведенными в работе [2]. На рис. 5 помещены заимствованные из нее фотографии разряда, инициированного шариком с диаметром $2a = 2.5 \text{ mm}$ при низком $p = 20 \text{ Torr}$, $E_0 = 0.8 \text{ KV/cm}$ и $\tau = 3$ (рис. 5, а) и

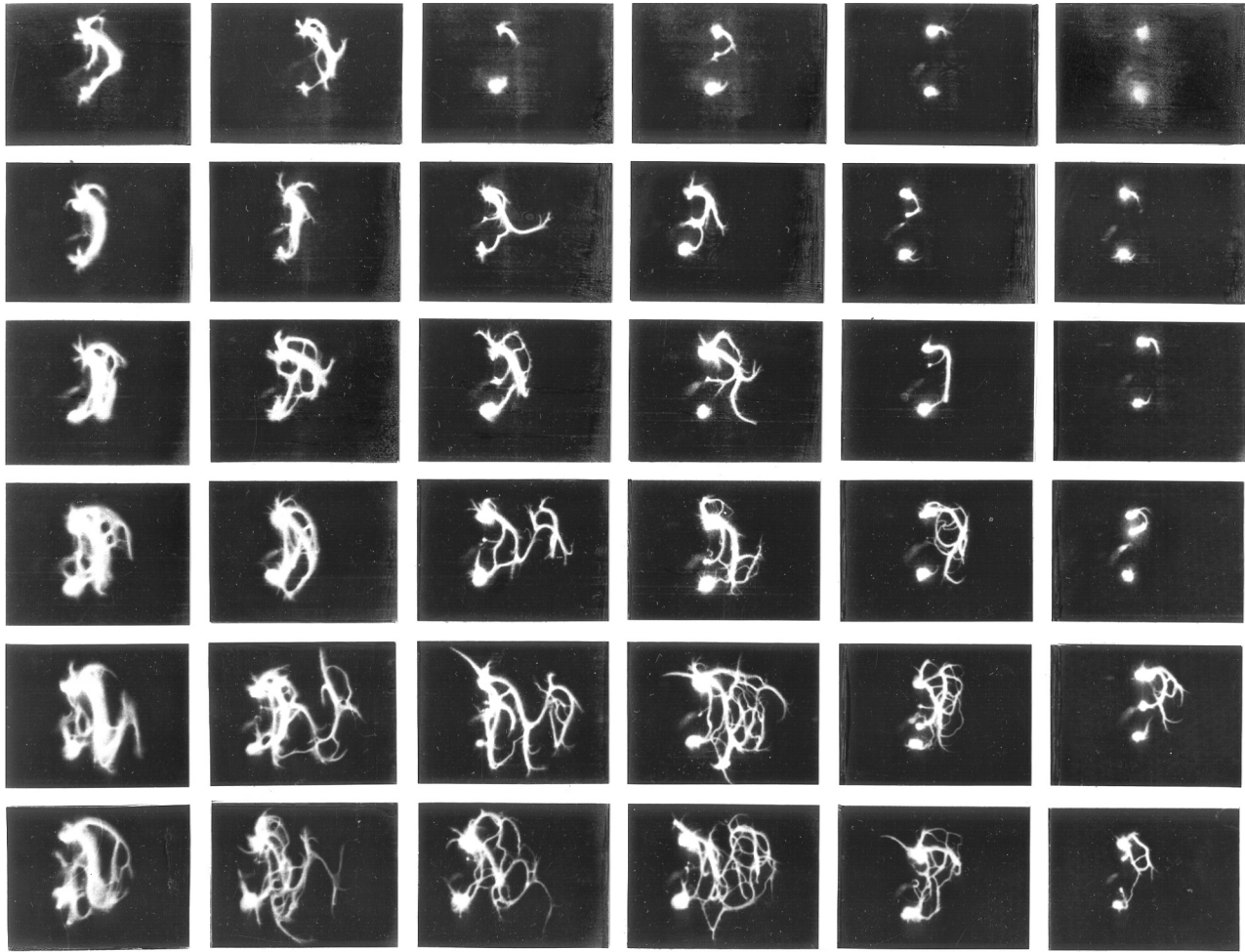


Рис. 2. То же, что и на рис. 1, при $2L = 3$ см.

$20 \mu\text{s}$ (рис. 5, *b*). Это — типично диффузный СВЧ разряд. Начавшись на полюсах шара, в результате ионизационно-полевого процесса он растягивается вдоль \mathbf{E}_0 на размер, не превышающий $\lambda/2$, а затем формирует диффузную плазменную петлю, направленную в сторону излучателя. Как следует из рис. 5, *a*, время образования такой структуры не превышает единиц микросекунд. За оставшееся до окончания СВЧ импульса время размер плазмоида увеличивается (рис. 5, *b*), но скорость этого процесса несоизмеримо меньше характерной скорости формирования начальной плазменной петли. В целом этот разряд в течение всего τ практически привязан к инициатору (плавное увеличение его размера обусловлено ионизационно-тепловым процессом смещения границы диффузного разряда навстречу излучению, который в данной работе не рассматривается).

На рис. 1 и 2 видно, что в определенном диапазоне Ψ стримерный разряд также может формировать присоединенную к полюсам инициатора петлю, обращенную в сторону излучателя. Она может состоять как из одного, так и нескольких стримерных каналов, как, например, показано на рис. 6, где в большем масштабе приведен

элемент матрицы с $2L = 2$ см при $p = 100$ Торг и $E_0 = 1.2$ KV/cm.

По аналогии с диффузной формой разряда, представленного на рис. 5, будем считать "привязанным" такой стримерный подкритический разряд, который в течение экспериментального времени τ образует только короткие (по сравнению с $\lambda/2$) отходящие от концов вибратора каналы или даже плазменную петлю, соединявшую концы иницирующего вибратора. Самостоятельно же развивающимся разрядом будем считать такой разряд, который за экспериментальные $40 \mu\text{s}$ смог сформировать плазменные резонансные вибраторы с длиной, близкой к $\lambda/2$, не имеющие прямого контакта с инициатором [3].

Типичный пример способного к самостоятельному развитию подкритического разряда при амплитуде поля E_0 , близкой к ее граничному значению, разделяющего способных к самостоятельному развитию и привязанных к инициатору СВЧ разрядов, приведен на рис. 7 ($2L = 2$ см, $p = 150$ Торг и $E_0 = 1.2$ KV/cm). На нем видна "плазменная синусоида", отходящая от нижнего конца инициатора в сторону излучателя. Этот рисунок наглядно иллюстрирует принцип саморазвития стример-

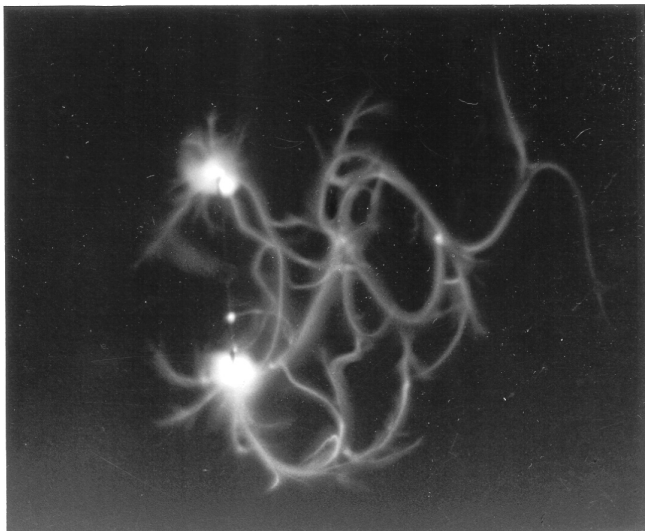


Рис. 3. Самостоятельно развивающийся инициированный стримерный СВЧ разряд при малой подкритичности: $\tau = 40 \mu\text{s}$, $2L = 3 \text{ cm}$, $2a = 8 \cdot 10^{-2} \text{ cm}$.



Рис. 4. Привязанный к инициатору глубоко подкритический СВЧ разряд в воздухе: $\tau = 40 \mu\text{s}$, $2L = 3 \text{ cm}$, $2a = 8 \cdot 10^{-2} \text{ cm}$.

ного СВЧ разряда в подкритическом поле. Каждый ближний к инициатору сравнительно прямолинейный участок этой "синусоиды", наклоненный примерно под 45° к E_0 , длиной, примерно равной $\lambda/2$, по существу является плазменным инициатором, обеспечивающим последующее развитие разряда [1].

Измеренная по рис. 7 длина стримерной синусоиды около 10 см. Следовательно, средняя скорость роста стримера V_{str} не менее $2.5 \cdot 10^5 \text{ cm/s}$. Эта величина практически совпала с V_{str} , оцененной выше по рис. 3 для разряда с развитой пространственной структурой при малой подкритичности.

В работе [4] приведена эмпирическая формула для V_{str} . Из нее следует, что при уменьшении E_0 средняя скорость СВЧ стримера стремится к постоянной величине V_{min} , зависящей только от давления воздуха. Например, при $p = 150 \text{ Torr}$ рассчитанная по этой формуле $V_{\text{min}} = 3.7 \cdot 10^5 \text{ cm/s}$, что с учетом пространственной неопределенности траектории стримера на рис. 7 и пространственной неоднородности величины E_0 в районе фокуса ЭМ луча неплохо согласуется с экспериментом. Т.е. если СВЧ стример "оторвался" от инициатора и начал развиваться самостоятельно, то он может иметь скорость V_{str} , не меньшую V_{min} . В этом смысле привязанный стримерный разряд, очевидно, — принципиально отличный плазменный объект, и между двумя рассматриваемыми формами подкритического разряда должна быть четкая граница по E_0 . Такое граничное поле в дальнейшем

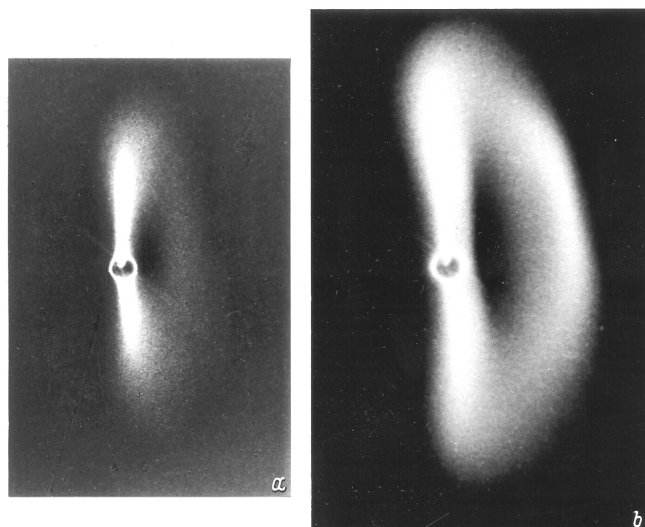


Рис. 5. Иницированный шариком диффузный СВЧ разряд в воздухе низкого давления.

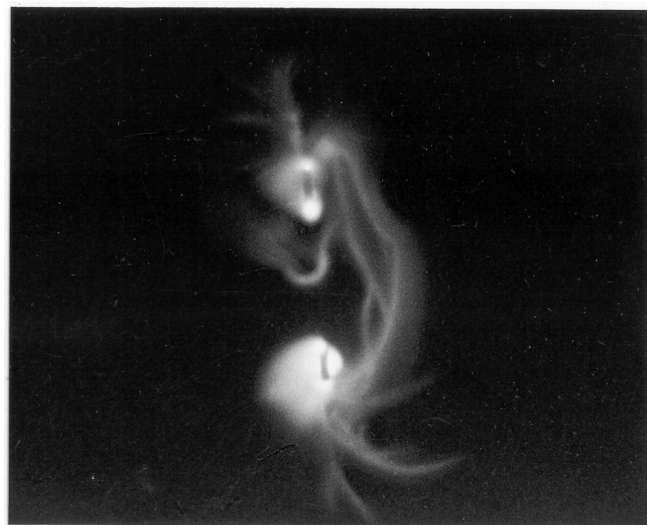


Рис. 6. Подкритический СВЧ разряд с "привязанной" к инициатору стримерной петлей: $\tau = 40 \mu\text{s}$, $2a = 8 \cdot 10^{-2} \text{ cm}$.

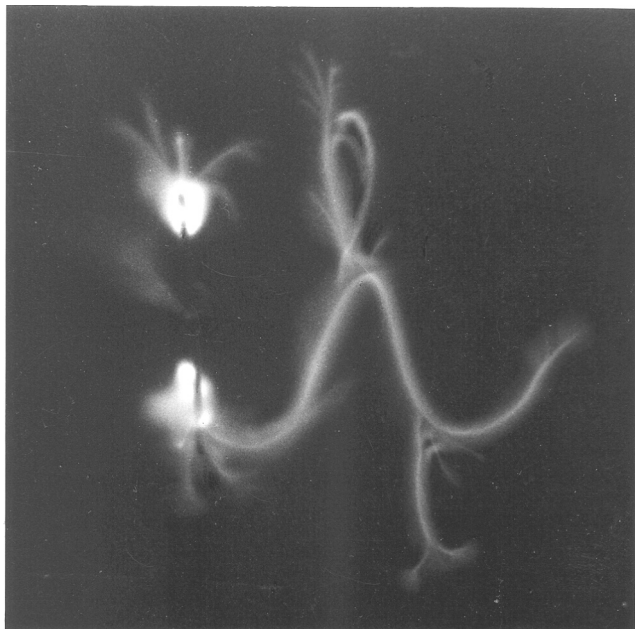


Рис. 7. Самостоятельно развивающийся подкритический иницированный СВЧ разряд при малом уровне поля: $\tau = 40 \mu\text{s}$, $2a = 8 \cdot 10^{-2} \text{ cm}$.

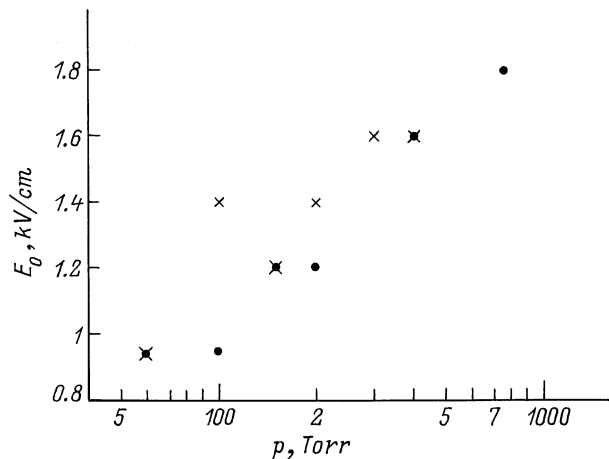


Рис. 8. Минимальная граничная амплитуда поля, при котором реализуется самостоятельно развивающийся подкритический СВЧ разряд ($2a = 8 \cdot 10^{-2} \text{ cm}$).

будем обозначать как E_L . Определенная в эксперименте E_L будет и нижней границей применимости формулы для V_{fr} (или V_{str}), приведенной в работе [4].

На рис. 8 для каждого экспериментального значения p указано минимальное значение E_0 , при котором реализуется самостоятельно развивающийся СВЧ разряд: • соответствует вибратору с $2L = 3 \text{ cm}$, × — с $2L = 2 \text{ cm}$. Эти величины получены на основе анализа рис. 1 и 2 с использованием сформулированного выше критерия внешнего отличия двух форм разряда.

Из рис. 8 видно, что экспериментальные значения E_L для более длинного вибратора лежат несколько ниже. В то же время по самому смыслу граничного поля оно является характеристикой именно разряда и не должно зависеть от способа его иницирования. Следовательно, зафиксированная слабая зависимость поля E_L от $2L$ показывает степень неопределенности его измерения в данном конкретном эксперименте.

На рис. 8 значения p по соответствующей координате отложены в логарифмическом масштабе, а E_0 — в линейном. Видно, что в этих координатах экспериментальные точки для E_L достаточно хорошо ложатся на прямую линию.

На рис. 9 по данным рис. 8 построена аппроксимирующая их зависимость $\Psi(p)$. Выше этой кривой лежит область существования привязанных подкритических СВЧ разрядов, а ниже — самостоятельно развивающихся. Область ниже прямой $\Psi = 1$ соответствует надкритическим разрядам. Из рисунка видно, что с ростом p диапазон Ψ , в котором может существовать самостоятельно развивающийся подкритический СВЧ разряд, расширяется. В условиях эксперимента он достигает $1 \leq \Psi \leq 17$.

Экстраполяция кривой $\Psi(p)$ в сторону низких p дает пересечение ее с линией уровня $\Psi = 1$ при $p = 20\text{--}30 \text{ Torr}$. Этот факт находится в хорошем согласии с экспериментальными результатами, приведенными в работе [2]. В ней констатировано, что в ЭМ пучке с $\lambda = 8.5 \text{ cm}$ стримерный разряд в воздухе реализуется лишь при $p \geq 25 \text{ Torr}$. Диффузный же СВЧ разряд при меньших p практически не выходит за область ЭМ пучка с $E_0 \geq E_k$, т. е. не развивается в подкритическом поле.

Количественное объяснение характера приведенной на рис. 9 зависимости $\Psi(p)$ в настоящее время отсутствует. В то же время ясно, что путь построения соответствующей модели проходит через анализ плазменно-электродинамических процессов, происходящих в от-

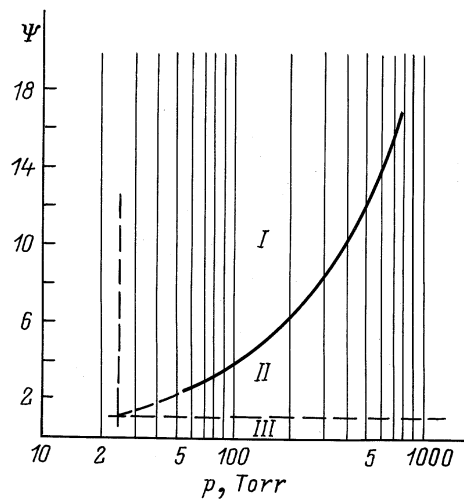


Рис. 9. Области существования различных видов стримерного СВЧ разряда (I–III).

дельном стримерном СВЧ вибраторе-инициаторе. Как видно из рис. 7, именно он является основным простейшим структурообразующим элементом разряда. Очевидно, что диссипативные процессы в таком вибраторе зададут амплитуду СВЧ тока вдоль него и, следовательно, заряд на растущем конце вибратора. Кривизна же плазменной границы этого конца определит поверхностную плотность заряда на нем, а следовательно, и усиление поля на головке стримера. В свою очередь увеличение размера области усиленного поля на конце плазменного вибратора при приближении его длины к резонансному значению создаст условия для зарождения нового стримерного СВЧ вибратора-инициатора.

Таким образом, эксперимент показал, что инициированный СВЧ вибратором импульсный подкритический стримерный разряд в воздухе в *ТЕМ*-пучке электромагнитной волны сантиметрового диапазона длин волн в зависимости от степени подкритичности исходного поля реализуется в двух принципиально различных видах. При малой подкритичности разряд, зародившись у концов инициирующего вибратора, отрывается от него и развивается самосогласованным образом, распространяясь навстречу излучению в виде удлиняющихся и ветвящихся плазменных стримерных каналов. Причем средняя скорость их роста не может быть меньше нескольких единиц, умноженных на 10^5 см/с. При больших подкритичностях разряд не способен оторваться от инициатора и в течение СВЧ импульса длительностью в десятки микросекунд остается как бы привязанным к вибратору. В эксперименте определена нижняя по полю граница существования самостоятельного развивающегося разряда. Из него следует, что как уровень граничного поля, так и диапазон подкритичности существования такого разряда растут с увеличением давления воздуха. В условиях эксперимента при атмосферном давлении максимальная подкритичность достигала 17. Следовательно, в этом случае при прочих равных условиях мощность генератора, обеспечивающая существование стримерного СВЧ разряда с развитой структурой, может быть уменьшена почти в 300 раз по сравнению с аналогичным надкритическим разрядом. Эксперимент подтвердил, что существование самостоятельного развивающегося СВЧ разряда связано именно с его стримерной структурой, характерной лишь для сравнительно высоких давлений воздуха. В условиях эксперимента она может быть реализована лишь при давлениях, больших 20 Torr . Это давление и является граничным, ниже которого самостоятельно развивающийся подкритичный разряд реализован быть не может. И наконец, приведенные в работе фактические данные позволяют уточнять роль отдельных физических факторов при построении модели стримерного СВЧ разряда.

Авторы выражают благодарность К.В. Александрову за помощь в проведении экспериментов.

Список литературы

- [1] Грачев Л.П., Есаков И.И., Ходатаев К.В. // ЖТФ. 1998. Т. 68. Вып. 4. С. 33.
- [2] Грачев Л.П., Есаков И.И., Мишин Г.И. и др. // ЖТФ. 1994. Т. 64. Вып. 1. С. 74–88.
- [3] Грачев Л.П., Есаков И.И., Мишин Г.И. и др. // Письма в ЖТФ. 1992. Т. 18. Вып. 22. С. 34–38.
- [4] Грачев Л.П., Есаков И.И., Мишин Г.И. и др. // ЖТФ. 1995. Т. 65. Вып. 5. С. 21–30.