

04:09;12

Поверхностный стримерный СВЧ разряд

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

Федеральное государственное унитарное предприятие „Московский радиотехнический институт РАН“,
113519 Москва, Россия
e-mail: esakov@dataforce.net

(Поступило в Редакцию 24 сентября 2001 г.)

Описывается импульсный СВЧ разряд в воздухе атмосферного давления на поверхности диэлектрической пластины и в зазоре между двумя диэлектрическими пленками. Разряд зажигается в квазиоптическом пучке СВЧ излучения с ТЕМ-структурой поля при существенном удалении от элементов, формирующих этот пучок, и уровне поля, меньшем критического пробойного значения. Разряд инициирован металлическим вибратором, расположенным непосредственно на поверхности пластины со стороны, противоположной источнику излучения, или между пленками. Разряд имеет вид прижатых к поверхности ветвящихся стримерных каналов, заполняющих поперечное сечение СВЧ пучка с уровнем поля, превышающим значение, отделяющее подкритическую и глубоко подкритическую формы стримерного СВЧ разряда.

Известно, что СВЧ разряд в квазиоптическом электромагнитном (ЭМ) пучке волн сантиметрового диапазона может быть зажжен и при амплитуде электрической компоненты исходного поля E_0 , меньшей критического пробойного значения E_c [1]. Для этого разряд должен быть инициирован, например, помещением в ЭМ пучок тонкого металлического вибратора [2]. В воздухе при давлениях p , больших нескольких десятков Торг, если E_0 лишь незначительно меньше E_c , такой подкритический разряд, зародившись у концов инициирующего вибратора, начинает распространяться навстречу излучению в виде растущих со скоростью v_{str} порядка 10^6 см/с, ветвящихся стримерных каналов, постепенно заполняя объем ЭМ пучка [3]. Бегущий навстречу источнику излучения со скоростью v_{fr} порядка 10^5 см/с фронт такого разряда экранирует инициирующий вибратор и внутренние области разряда. Активные ионизационные процессы у такого самостоятельного развивающегося, оторванного от инициатора объемного подкритического разряда идут на его фронте толщиной, примерно равной половине длины волны ЭМ излучения $\lambda/2$.

При большем уменьшении исходного E_0 по сравнению с E_c СВЧ разряд теряет способность отрываться от инициирующего вибратора. Такой глубоко подкритический разряд в воздухе при p , больших десятков Торг, в импульсном поле с длительностью τ_{pul} в десятки микросекунд реализуется в виде системы стримерных каналов. Но в отличие от подкритического разряда с $E_0 < E_c$ стримерные каналы глубоко подкритического разряда при $E_0 \ll E_c$ контактируют с концами инициирующего вибратора в течение всего τ_{pul} . В работе [1] определено, что в воздухе атмосферного давления, для которого $E_c = 42$ кВ/см, при $\lambda = 8.9$ см пороговое значение поля E_{fr} , отделяющее подкритическую и глубоко подкритическую формы СВЧ разряда, составляет 2.5 кВ/см.

В описываемых экспериментах на пути распространения к СВЧ источнику разряда в подкритическом исходном поле с $E_{fr} < E_0 < E_c$ располагается диэлектрическая радиопрозрачная преграда, перегораживающая

сечения ЭМ пучка. При этом разряд инициируется вибратором, который располагается непосредственно на ее поверхности со стороны, противоположной источнику излучения. Фиксируется внешний вид разряда, что позволяет судить о его структуре, способности „отрываться“ от инициатора, возможности переходить за перегородку и распространяться навстречу излучению и т.п. В опытах меняются материал перегородки, ее толщина, число инициаторов и инициатор помещается между двумя диэлектрическими поверхностями с малым зазором между ними.

Эксперименты проводились на установке, подробно описанной в работе [3]. В ней линейно поляризованное ЭМ излучение с ТЕМ-структурой поля, $\lambda = 8.9$ см и $\tau_{pul} = 40$ мкс сфокусировано. Область фокуса отстоит от ближайших элементов конструкции на десятки сантиметров. В фокальной плоскости, перпендикулярной направлению ЭМ излучения, поле имеет примерно гауссово распределение амплитуды с ее максимальным значением в фокусе $E_0 = 6.5$ кВ/см. Размеры фокусного пятна по спаду амплитуды поля в e раз: вдоль вектора $\mathbf{E}_0 - x_0 = 5.2$ см, а в перпендикулярном ему направлении — $y_0 = 2.5$ см. Вектор \mathbf{E}_0 вертикален. Эксперименты проводились в режиме одиночных СВЧ импульсов. Паузы между ними были не менее 1 мин. Опыты проводились в атмосферном воздухе. В ходе них в фокусном пятне ЭМ пучка помещался параллельно \mathbf{E}_0 инициирующий разряд СВЧ вибратор, выполненный из вольфрамового провода диаметром $2a = 3 \cdot 10^{-2}$ см и длиной $2l = 1$ см. Вибратор укреплялся на поверхности сравнительно тонкого (по сравнению с $\lambda/2$) радиопрозрачного диэлектрика, перпендикулярного направлению распространения ЭМ излучения, со стороны, противоположной источнику излучения. В опытах в качестве диэлектрика использовались либо кварцевое стекло марки КВ с диэлектрической проницаемостью $\epsilon \approx 4$ и тангенсом угла диэлектрических потерь $\text{tg} \delta \approx 10^{-4}$, либо полиэтилен с $\epsilon \approx 2.2$ и $\text{tg} \delta \approx 10^{-4}$ [4].

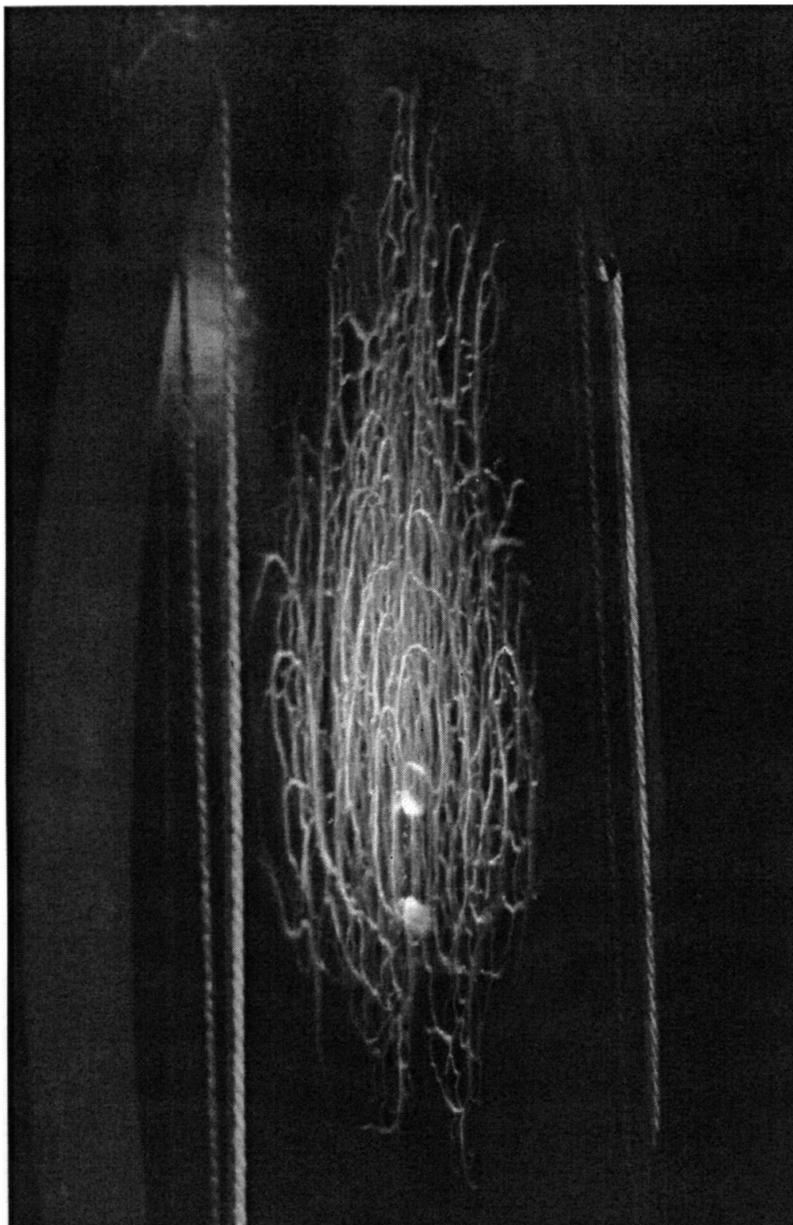


Рис. 1. Стримерный СВЧ разряд на поверхности кварцевой пластины толщиной $d = 1$ см, инициированный одним вибратором ($p = 760$ Torr).

Разрядная область фотографировалась с временем экспозиции, превышающим $\tau_{\text{прл}}$. На нижеприведенных таких „интегральных“ фотографиях излучение поступает слева направо, а вектор \mathbf{E}_0 , как и в эксперименте, вертикален. Фоторегистрация осуществлялась со стороны инициатора вдоль линии, лежащей в плоскости, примерно перпендикулярной \mathbf{E}_0 и проходящей через ось ЭМ пучка под небольшим углом к плоскости диэлектрика. На фотографиях размер $2l$ инициатора может служить вертикальным масштабом изображения. Для определения его горизонтального масштаба необходимо учитывать ракурс съемки, для чего ниже в тексте при описании конкретных фотографий указаны размеры, позволяющие оценить этот масштаб.

Опыты показали, что во всех экспериментах разряд развивается только на поверхности, на которой укреплялся инициатор, в виде стримерных каналов максимальным диаметром в несколько сотых долей сантиметра, заполняющих поперечные сечения ЭМ пучка, т.е. разряд имеет способность отрываться от инициатора и развиваться самостоятельно как развитый поверхностный стримерный подкритический СВЧ разряд. Стримерные каналы имели преимущественно сине-фиолетовый цвет, характерный и для стримерных каналов объемного СВЧ разряда в воздухе, с ярко-белыми участками, в основном вытянутыми вдоль \mathbf{E}_0 .

На рис. 1 приведен типичный разряд на поверхности кварцевого диска диаметром 20 см и толщиной $d = 1$ см.

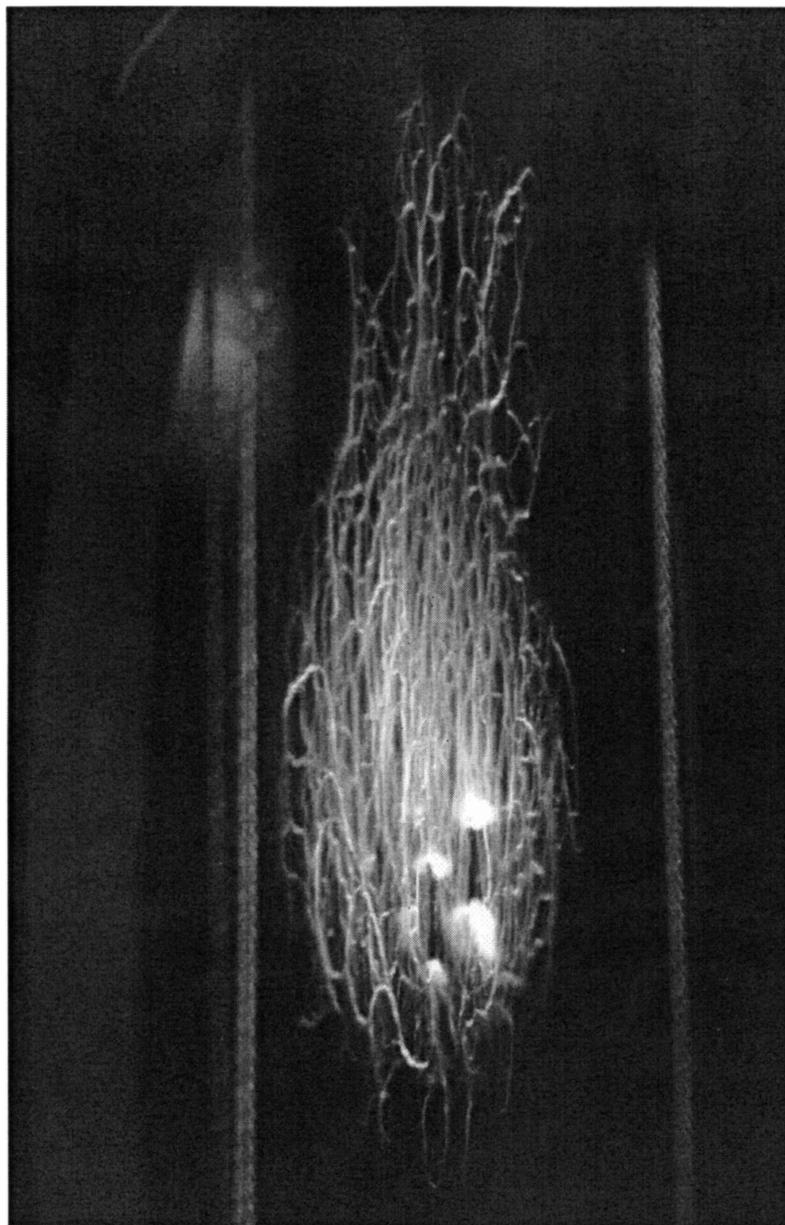


Рис. 2. Стримерный СВЧ разряд на поверхности кварцевой пластины толщиной $d = 1$ см, инициированный двумя вибраторами ($p = 760$ Torr).

На фотографии слева видна боковая поверхность диска, а с обеих сторон от разряда — две вертикальные нити, на которых он подвешивался в ЭМ пучок. Расстояние между нитями равно 15.5 см и может быть использовано в качестве горизонтального масштаба. Разрядная область симметрична в поперечном вектору E_0 направлении при полном размере около 11 см. Ее размер вниз от центра вибратора примерно равен 3 см, а вверх — 7 см. Концы инициирующего вибратора светятся более ярко, фиксируя испарение его поверхности. Температура плавления вольфрама $T \approx 4300^\circ\text{C}$, а кипения — 5700°C [4], следовательно, температура имеющих с ним контакт стримерных каналов лежит в этом диапазоне.

На рис. 2 приведен разряд с двумя вибраторами, укрепленными на поверхности того же кварцевого диска в пределах фокусного пятна ЭМ пучка. Расстояние между вибраторами равно 1.5 см. На фотографии видно, что характер разряда и его размеры существенно не изменились. Это по-прежнему прижатые к поверхности кварца стримерные каналы, заполняющие поперечное сечение ЭМ пучка.

На рис. 3 представлен разряд в зазоре между двумя листами полиэтиленовой пленки толщиной $d \approx 10^{-2}$ см, образующими стандартную папку „файл“, свободно подвешенную за ее верхний край. С левой стороны фотографии видны эллиптические отверстия в папке, служащие для ее подшивки, размером 1×0.6 см. Видно, что

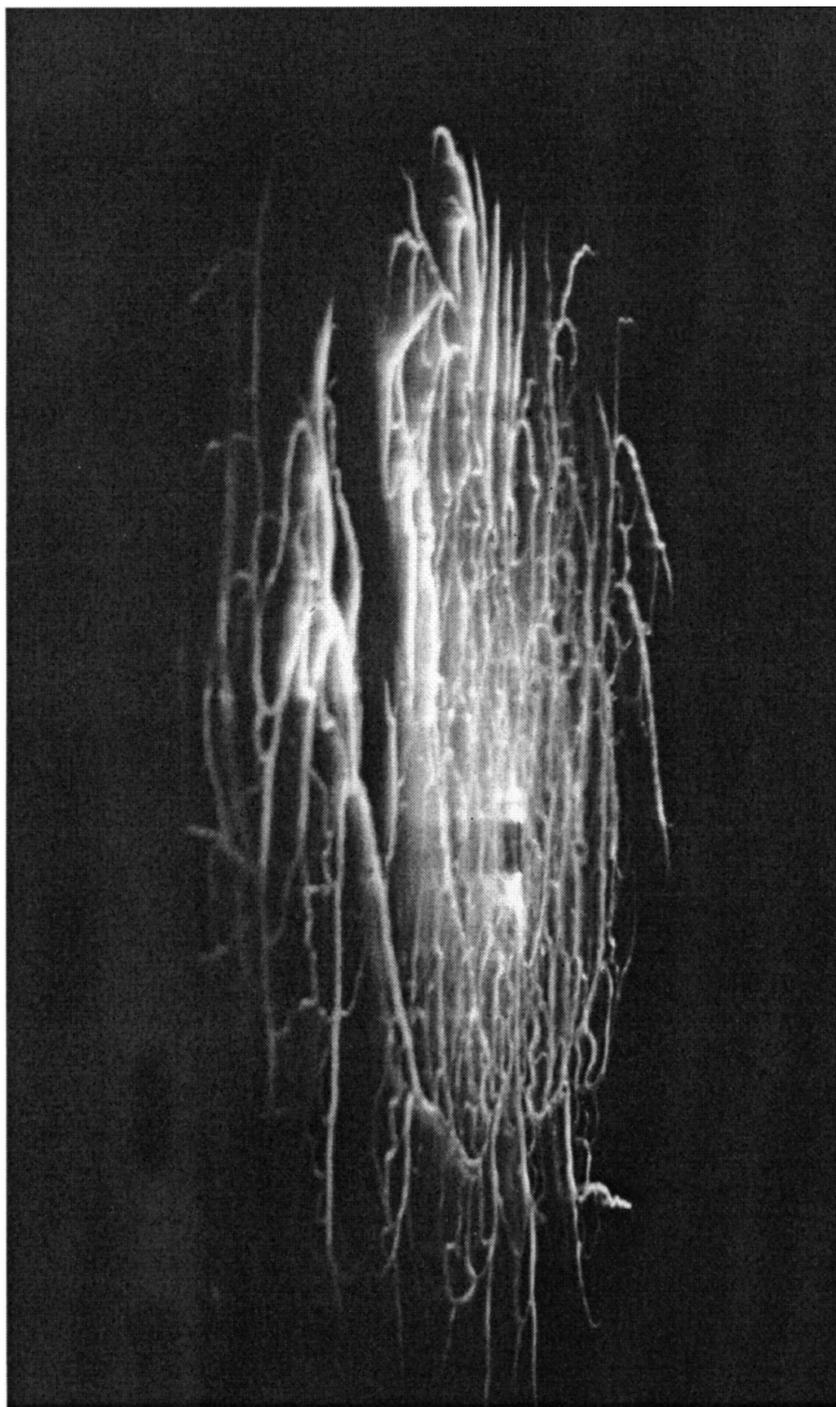


Рис. 3. Стримерный СВЧ разряд в зазоре между двумя полиэтиленовыми листами толщиной $d = 10^{-2} - 9 \cdot 10^{-3}$ см, инициированный одним вибратором ($p = 760$ Torr).

„разряд в папке“ качественно не отличается от поверхностного СВЧ разряда, приведенного на рис. 1 и 2. Однако он более симметричен относительно инициатора и в своей верхней левой части имеет участки с более белыми и „толстыми“ стримерными каналами. Очевидно, последнее обстоятельство связано с оплавлением поверхности пленок высокотемпературными разрядными каналами из-за меньшего зазора между пленками

на этих участках. Зазор между пленками в центре папки Δ задается диаметром $2a$ вибратора $\Delta = 2a$. По фотографии можно оценить максимальные вертикальный и горизонтальный размеры разрядной области: $2x_{\text{dis}} = 10.5$ см и $2y_{\text{dis}} = 6$ см.

Как указывалось, в атмосфере при данной λ ЭМ поля его граничное значение, отделяющее подкритическую и глубоко подкритическую формы разряда,

$E_{fr} = 2.5 \text{ kV/cm}$. В условиях описываемых экспериментов в фокальной плоскости ЭМ пучка амплитуда поля спадает до такой величины при смещении от фокуса вдоль вектора \mathbf{E}_0 на размер, примерно равный x_0 , а перпендикулярно ему — на y_0 . Очевидно, не случайно, что указанные выше значения x_{dis} и y_{dis} для разряда в папке, помещенного на рис. 3, практически совпадают с x_0 и y_0 . Т.е. граница разрядной области для поверхностного стримерного подкритического разряда с развитой структурой определяется тем же значением поля E_{fr} .

Для приведенных на рис. 1 и 2 разрядов на кварце их вертикальный размер также примерно равен $2x_0$, а их вертикальная несимметрия относительно вибратора, скорее всего, определяется его неточным расположением в фокусе ЭМ пучка. Причина же большего горизонтального размера этих разрядов неясна, и ее определение требует дополнительного исследования. Можно предположить, что она обусловлена влиянием толстого кварцевого диска на распределение поля в районе фокуса.

У стримерных разрядов в различных диапазонах длин волн ЭМ поля, включая СВЧ и постоянные поля, способность их роста обусловлена механизмом усиления поля на конце стримера. Эта зона усиленного поля с $E > E_c$ имеет некую протяженность. Выполненные в рамках данных исследований эксперименты с полиэтиленовыми пленками толщиной d в сотые доли сантиметра не зафиксировали переход разряда на противоположную от инициатора сторону. Следовательно, размер области усиленного поля на концах стримерных каналов меньше этой величины. Это означает, что диаметр головной части стримерных каналов при атмосферном p также не превышает 10^{-3} cm .

Таким образом, экспериментально реализован поверхностный подкритический импульсный СВЧ разряд с развитой пространственной структурой в воздухе атмосферного давления p в линейно поляризованном квазиоптическом пучке ЭМ поля с длиной волны $\lambda = 8.9 \text{ cm}$ и длительностью импульса $t_{pul} = 40 \mu\text{s}$. Разряд инициирован СВЧ вибратором, расположенным на поверхности радиопрозрачного кварцевого диска или полиэтиленовой пленки, перегораживающих сечение ЭМ пучка, со стороны, противоположной источнику СВЧ излучения. Он развивается в виде растущих ветвящихся стримерных каналов с максимальным диаметром в сотые доли сантиметра, способных отрываться от инициатора и заполнять сечение ЭМ пучка с амплитудой поля, большей или равной граничному уровню $E_{fr} = 2.5 \text{ kV/cm}$. При атмосферном давлении это граничное поле совпадает с его известным значением, отделяющим подкритическую и глубоко подкритическую формы объемного стримерного СВЧ разряда, соответствующую подкритичности $E_c/E_{fr} \approx 17$. Реализованный подкритический СВЧ разряд может быть инициирован и несколькими вибраторами, расположенными на поверхности диэлектрика. Он также реализуется в зазоре между двумя диэлектрическими

поверхностями с размером зазора Δ , не превышающим сотые доли сантиметра. В условиях эксперимента при подкритичности поля $E_c/E_0 > 6.5$ разряд не переходит на противоположную относительно инициатора сторону пленочного полиэтиленового диэлектрика и не распространяется навстречу излучению при толщине пленки d , большей тысячных долей сантиметра.

Список литературы

- [1] Грачев Л.П., Есаков И.И., Ходатаев К.В. // ЖТФ. 1999. Т. 69. Вып. 11. С. 19–24.
- [2] Грачев Л.П., Есаков И.И., Мишин Г.И., Ходатаев К.В. // ЖТФ. 1995. Т. 65. Вып. 7. С. 60–67.
- [3] Грачев Л.П., Есаков И.И., Мишин Г.И., Ходатаев К.В. // ЖТФ. 1995. Т. 65. Вып. 5. С. 21–30.
- [4] Григорьев И.С., Мейлихов Е.З. Справочник. Физические величины. М.: Энергоатомиздат, 1991. 1232 с.