

ПЕРСПЕКТИВЫ ПРИМЕНЕНИЯ СВЧ РАЗРЯДОВ НА ДИЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ СЕТКЕ, ВОЗБУЖДАЕМЫХ В ПОЛЕ КВАЗИОПТИЧЕСКОГО ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ПУЧКА, В ПРОЦЕССАХ ПЛАЗМЕННО-СТИМУЛИРОВАННОГО ГОРЕНИЯ

Л.П. Грачев, И.И. Есаков, А.А. Раваев, К.В. Ходатаев

ФГУП «Московский радиотехнический институт РАН», Москва 117519, Россия
ravaev@mrtiran.ru

Аннотация

В настоящее время для решения ряда аэродинамических задач рассматриваются различные способы использования плазменных технологий. В докладе анализируется возможность использования в зоне горения горючей смеси канала сверхзвукового прямоточного реактивного двигателя СВЧ разряда на диэлектрической сетке.

В результате скорость распространения разрядного фронта от инициатора навстречу СВЧ излучению значительно увеличивается. Предварительные эксперименты по реализации такого разряда на диэлектрической сетке показали, что и в этом случае стримерные каналы бегут только по ее поверхности. Это свойство разряда на диэлектрической сетке после детального исследования его характеристик может поставить вопрос об использовании такого типа разряда в камере сгорания прямоточного реактивного двигателя. При этом, возможно, отпадет необходимость в торможении поступающего на вход канала двигателя потока воздуха, повысится полнота сгорания горючего и сократится протяженность зоны его горения.

1. Введение

В настоящее время для решения ряда аэродинамических задач рассматриваются различные способы использования плазменных технологий. В данной работе анализируются перспективы применения газового электрического разряда, возбуждаемого полем квазиоптического СВЧ пучка, в

сверхзвуковых прямоточных реактивных двигателях.

На **Рис.1.1** помещена условная схема такого двигателя. Во входном конфузоре его канала скорость набегающего воздушного потока уменьшается до числа Маха $M = 1$. За критическим сечением этого канала поток дополнительно замедляется и в него впрыскивается горючее. Сформированная горючая смесь поджигается и сгорает. Затем поток ускоряется до $M = 1$ и окончательно ускоряется в выходном диффузоре двигателя.

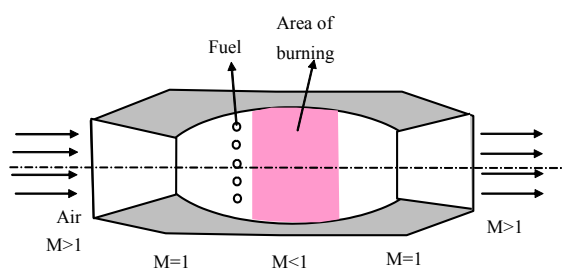


Рис.1.1.

В области горения смеси должно быть решено несколько задач. Смесь необходимо поджечь, а область ее горения стабилизировать в пространстве. При этом желательно обеспечить сравнительно малую протяженность этой области. Изложенное ниже физическое явление как раз и может иметь перспективы в качестве нетрадиционного способа решения этих задач.

2. СВЧ разряд, возбуждаемый полем квазиоптического пучка

На **Рис.2.1** помещена схема реализации газового электрического разряда в квазиоптическом СВЧ пучке. Она содержит СВЧ генератор, с выхода

которого электромагнитная (ЭМ) волна поступает на вход системы, формирующей квазиоптический СВЧ пучок.

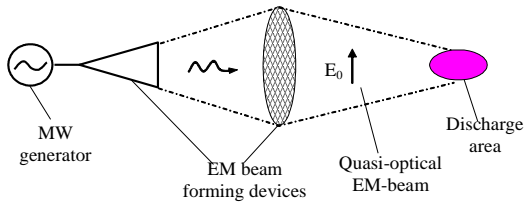


Рис.2.1.

Если в некоторой области этого пучка амплитуда электрической составляющей ЭМ волны E_0 больше поля E_{br} , необходимого для электрического пробоя газа при заданном его давлении p , то в этой области произойдет электрический пробой и разовьется СВЧ разряд. Опыты показали, что в диапазоне частот ЭМ колебаний $f \approx (15 \div 2)$ GHz, которым в пучке с ТЕМ структурой поля соответствуют длины волн $\lambda = (2 \div 15)$ см, виды реализующихся разрядов идентичны [1]. Так, в воздухе при давлениях p в десятки-сотни Торр разряд представляет собой объемную систему плазменных каналов. Иллюстрирующая фотография разряда такого вида помещена на Рис.2.2. Она соответствует $p = 100$ Торр, $\lambda = 8.9$ см, $E_0 \approx 6.5$ kV/cm и длительности СВЧ импульса с прямоугольной огибающей $\tau_{pul} = 40$ μ s. На фотографии, как и на приводимых ниже аналогичных фотографиях, вектор E_0 вертикален, а излучение на разрядную область поступает слева направо. Масштабом изображения может служить характерный поперечный размер этой области, примерно равный 15 см. Отдельные плазменные участки такого разряда представляют собой резонансные ЭМ вибраторы. В результате СВЧ разряд такого вида эффективно взаимодействует с возбуждающим его ЭМ полем, а температура газа его резонансных участков достигает сотен – тысячи градусов. Следовательно, разряд такого вида способен осуществлять объемный поджиг горючей смеси.



Рис.2.2.

Однако, практически реализовать свободно локализованный разряд при высоких газовых p затруднительно. Так, в воздухе минимальное пробойное – критическое поле в зависимости от p может быть рассчитано по следующей формуле:

$$E_{br \min} = E_{cr} = 42 \cdot p; V / cm$$
 при размерности p – Торр. Из нее следует, что, например, при $p = 1$ Atm = 760 Торр амплитуда поля $E_{cr} = 32$ kV/cm. В линейно поляризованной «бегущей» ЭМ волне плотность потока ЭМ энергии Π определяется формулой

$$\dot{I} = \dot{A}_0^2 / (2 \cdot Z_0), \text{ где } Z_0 = 120 \cdot \pi; \Omega.$$

При оцененном значении E_{cr} она дает $\Pi = 1.3 \cdot 10^6$ W/cm². Из теории следует, что максимально сфокусированный ЭМ пучок в области фокуса имеет характерный поперечный размер масштаба λ . Например, при $\lambda \approx 10$ см площадь этого сечения $S_{beam} \approx \lambda^2 = 10^2$ см². Следовательно, для осуществления пробоя воздуха при этом p мощность СВЧ пучка $P_{beam} = \Pi \cdot S_{beam}$ должна быть не меньше 130 MW !

В то же время, опыты показали, что, учитывая современные технические возможности по генерации СВЧ волн, такой вид разряда все же может быть реализован и при высоких p . Для этого условие пробоя дополнительными средствами должно быть обеспечено лишь в локальной области СВЧ пучка,

т.е. электрический пробой газа должен быть инициирован.

3. Подкритический СВЧ разряд с объемно-развитой стримерной структурой

Один из способов инициации пробоя в пучке с $E_0 < E_{cr}$ заключается в помещении в этот пучок вдоль его вектора E_0 металлического цилиндрического ЭМ вибратора [2]. Так, известно, что при помещении в СВЧ поле металлического шарика диаметром $2a \ll \lambda/4$ поле на его полюсах, где вектор E_0 перпендикулярен поверхности шарика, $E_{pol} = 3E_0$. При помещении же в ЭМ поле цилиндрического вибратора со сферически закругленными концами длиной $2L$ поле E_{pol} может возрасти многократно, особенно при приближении длины вибратора к электродинамически резонансной величине $2L_{res} \approx \lambda/2$. В результате даже при $E_0 \ll E_{cr}$ поле E_{pol} может превосходить E_{cr} , и такой вибратор способен инициировать СВЧ пробой газа при высоких p .

Эксперименты показали, что в некотором диапазоне подкритичности при сравнительно высоких p развивающийся после инициации пробоя разряд имеет так же как и надкритический разряд объемно-развитую структуру плазменных каналов. Например, при $\lambda \approx 10$ см в воздухе атмосферного p он имеет такой вид при $E_0 > 2$ кВ/см [1]. Характерная фотография такого разряда при $\lambda = 8.9$ см, $E_0 \approx 6$ кВ/см и $\tau_{pul} = 40$ мкс помещена на Рис.3.1.

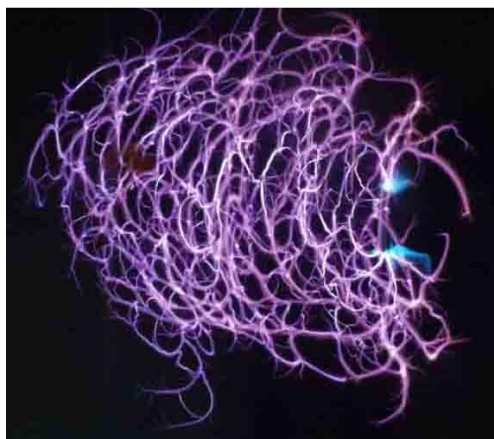


Рис.3.1.

С правой стороны этой области находится цилиндрический вибратор - инициатор диаметром $2a = 3.5$ мм и длиной $2L = 2.5$ см. На фотографии концы вибратора светятся более ярко. Его размер $2L$ может служить масштабом изображения.

Подробное изучение свойств разрядов такого вида показало, что они представляют собой динамически развивающиеся плазменные образования. Разрядную область формируют прорастающие и ветвящиеся стримерные каналы. Каналы, зарождаясь на полюсах инициатора, прорастают преимущественно навстречу и поперек ЭМ излучению, заполняя объем ЭМ пучка.

Характерная скорость роста каналов $v_{str} \approx 10^6$ см/с, а скорость распространения фронта разряда $v_{fr} \approx 3 \cdot 10^5$ см/с. Очевидно, что с точки зрения аэродинамики эти значения скоростей весьма значительны. Именно поэтому выполненные опыты по зажиганию такого разряда в потоке воздуха, имеющего скорость $v_{fl} \leq 500$ м/с, показали, что и в этом случае структура разряда и его свойства практически не меняются [3].

Отдельные участки плазменных каналов разряда рассматриваемого вида длиной, соизмеримой с $\lambda/2$, являются резонансными ЭМ вибраторами, имеющими большую эффективную площадь энергетического взаимодействия с ЭМ полем S_{eff} . В результате в зависимости от экспериментальных условий, так же как и у надкритических разрядов, температура газа в этих каналах может подниматься до тысячи градусов. Именно поэтому опыты по реализации такого разряда даже в высокоскоростном потоке пропан-воздушной горючей смеси продемонстрировали, что разряд поджигает эту смесь. Иллюстрирующая фотография помещена на Рис.3.2 [4].



Рис.3.2.

Она соответствует $\lambda = 2.5 \text{ cm}$, $E_0 = 3 \text{ kV/cm}$, $\tau_{\text{pul}} = 100 \mu\text{s}$ и статическому газовому давлению смеси стехиометрического состава $p = 100 \text{ Torr}$. Поток имеет скорость $v_{\text{fl}} = 500 \text{ m/s}$ и направлен снизу вверх. В эксперименте область горения имеет горизонтальный размер около 4 см.

Серия подобных опытов показала, что данный СВЧ разряд в различных условиях поджигает распространяющуюся через его область пропан-воздушную горючую смесь, область ее горения стабилизирована в пространстве вплоть до v_{fl} в сотни m/s , а темп сгорания высок. Поджигается и сгорает и бедная смесь, концентрация пропана в которой значительно меньше ее величины, ограничивающей зону воспламенения пропан-воздушной смеси. В ближней зоне стримерных каналов скорость распространения фронта пламени по смеси достигает 150 m/s . Многие перечисленные особенности процесса горения смеси, подожженной разрядом такого вида, объясняются тем, что в результате плазмохимических процессов стримерные каналы разряда являются источниками жесткого ультрафиолетового (УФ) излучения. В результате молекулярный состав горючей смеси значительно модифицируется.

Такой вид разряда по приведенной на **Рис.3.3** условной схеме может быть использован для поджига горючего и в прямоточном реактивном двигателе. При этом надо иметь в виду следующее.

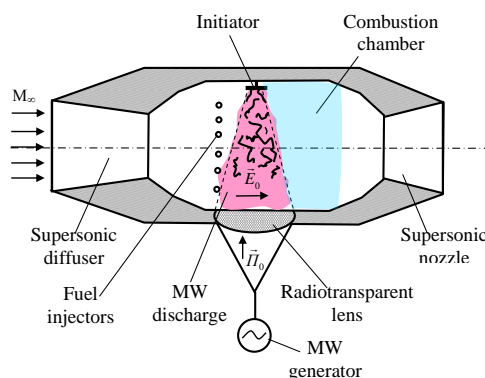


Рис.3.3.

Даже в случае предельно сфокусированного пучка для зажигания рассматриваемого вида разряда мощность СВЧ пучка P_{beam} должна быть весьма значительной. Так, **Рис.3.1** соответствует $P_{\text{beam}} \approx 2 \text{ MW}$, а **Рис.3.2** – $P_{\text{beam}} \approx 100 \text{ kW}$. На практике реализовать такие значения P_{beam} можно только в импульсном режиме при τ_{pul} , не превышающей десятки микросекунд, и средней мощности, которая определяется частотой следования импульсов, P_{mid} – в несколько киловатт. Естественно, что за время τ_{pul} разряд должен перекрыть все поперечное сечение канала двигателя.

На практике ситуация может усложниться при больших поперечных размерах канала горения. В этом случае встает задача о поиске возможных путей увеличения v_{fr} .

4. Подкритический СВЧ разряд на поверхности диэлектрика

В процессе исследования свойств рассматриваемого вида разряда были выполнены эксперименты, в которых в фокусную область СВЧ пучка помещалась диэлектрическая пластина, на поверхности которой укреплялся ЭМ вибратор. В одной из серий этих опытов пластина помещалась вдоль оси ЭМ пучка в его $E_0 - \Pi$ плоскости. Они показали, что в этом случае разрядные стримерные каналы, распространяясь преимущественно навстречу ЭМ излучению и поперек его, не отрываются от диэлектрической поверхности [5].

Характерная фотография такого разряда помещена на **Рис.4.1**.

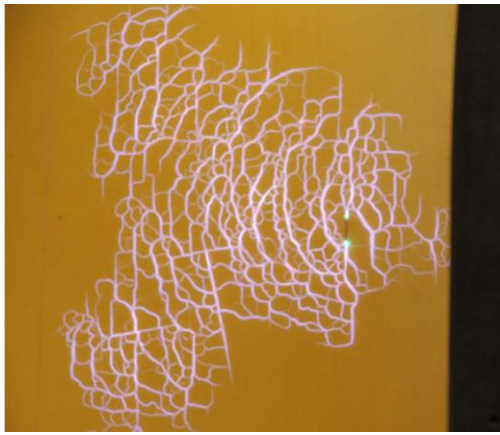


Рис.4.1.

Она соответствует $\lambda = 8.9$ см, $E_0 \approx 6$ кВ/см, $\tau_{pul} = 40$ мкс и давлению воздуха $p = 1$ Атм. Разряд распространяется по поверхности стеклотекстолитовой пластины толщиной 1 мм. На этой поверхности укреплен линейный вибратор с $2a = 0.3$ мм и $2L = 14$ мм. На фотографии он находится справа, и его концы светятся более ярко. Из фотографии следует, что разряд распространяется по поверхности пластины с максимальной скоростью $v_{fr} \approx 5 \cdot 10^5$ см/с. Она в одинаковых опытных условиях примерно в полтора раза превышает значение v_{fr} инициированного подкритического разряда с объемно-развитой стримерной структурой.

Однако, в настоящее время не просматриваются варианты использования такого СВЧ разряда в прямоточном реактивном двигателе. В то же время можно проанализировать схему применения стримерного СВЧ разряда на поверхности диэлектрика, если эта поверхность имеет структуру сетки, а стримерные каналы разряда по-прежнему «бегут» именно по ее поверхности. Для выяснения последнего предположения был выполнен специальный эксперимент.

В опытах плоская сетка с прямоугольными ячейками 5×5 мм, выполненная из капроновых нитей диаметром 0.3 мм, помещалась вдоль оси СВЧ пучка в его $E_0 - \Pi$ плоскости. Эксперименты выполнялись на установке с $\lambda = 8.9$ см при значениях $E_0 = 6$ кВ/см,

$\tau_{pul} = 40$ мкс и давлении воздуха $p = 1$ Атм. Пробой инициировался металлическим ЭМ вибратором с $2a = 0.3$ мм и $2L = 4$ см. Характерная фотография реализующегося в этих условиях разряда помещена на Рис.4.2. На ней справа расположен вибратор со светящимися концами и промежуточными светящимися точками.

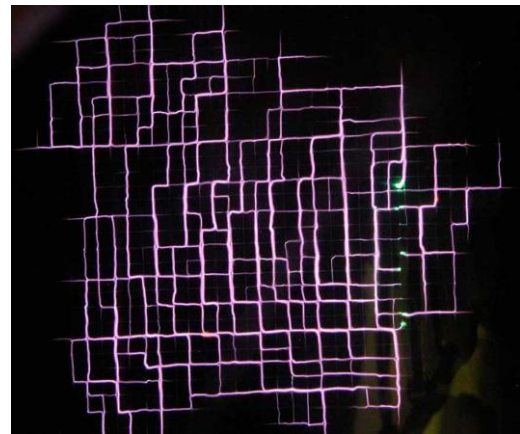


Рис.4.2.

Эксперименты показали, что и в этом случае разряд формируют ветвящиеся стримерные каналы, которые распространяются только по поверхности диэлектрических нитей.

5. Заключение

Таким образом, возбуждаемый полем квазиоптического пучка СВЧ разряд на диэлектрической сетке после детального исследования его свойств может иметь перспективу использования в плазменной аэродинамике. Схема его возможного применения в прямоточном реактивном двигателе приведена на Рис.5.1.

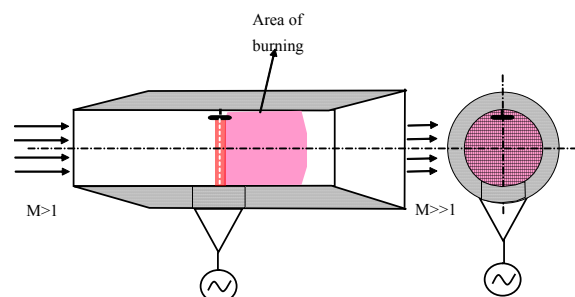


Рис.5.1.

В такой постановке сетка может практически не создавать аэродинамическое сопротивление потоку. Может не потребоваться его

торможение на входе двигателя. Плазмохимическая модификация молекулярного состава горючей смеси позволит сократить протяженность области ее горения. Могут рассматриваться различные пути инъекции горючего в поток через внутренние каналы в сетке и его смешением с воздухом.

Однако, первоначально потребуется подробное изучение фундаментальных свойств разряда такого вида, которое будет включать в себя:

1. Определение свойств разряда в зависимости от таких параметров сетки, как ее шаг, диаметр и материал нитей, форма их поперечного сечения и т.п.

2. В различных условиях определение скорости распространения по сетке разрядного фронта v_{fr} .

3. Получение данных по влиянию на характеристики разряда продува сетки высокоскоростным потоком воздуха и его смеси с пропаном при различном их процентном составе.

4. Измерение протяженности поджигаемой разрядом области горения потока пропан-воздушной смеси и степени ее сгорания.

Литература

1. Александров К.В., Грачев Л.П., Есаков И.И., Федоров В.В., Ходатаев К.В. *Области реализации различных типов СВЧ-разряда в квазиоптических электромагнитных пучках //ЖТФ.-2006.-Т.76, вып.11. -С.52-60.*

2. Грачев Л.П., Есаков И.И., Мишин Г.И., Ходатаев К.В. *Высокочастотный пробой воздуха в присутствии вибратора // ЖТФ. -1995. -Т.65, Вып.7. -С.60-67.*

3. Грачев Л.П., Есаков И.И., Ходатаев К.В. *Стимерный СВЧ разряд в сверхзвуковом потоке воздуха //ЖТФ. -1999. -Т.69, Вып.11.-С.14-18.*

4. Esakov I.I., Grachev L.P., Bychkov V.L., VanWie D. *Investigation of undercritical MW discharge with volumetrically developed streamer structure in propane-air supersonic stream //44rd AIAA Aerospace Sciences Meeting and*

Exhibit (9-12 January 2006, Reno, Nevada).-AIAA 2006-790.

5. Kirill V.Khodataev. *The Nature of Surface MW Discharges //48th AIAA Aerospace Sciences Meeting and Exhibition. 4-8 January 2010, Orlando, Florida. Paper AIAA 2010-1378.*