

## Сравнение характеристик скользящих РБР и ДБР в прикладных задачах аэродинамики

Ю.В. Маношкин, А.А. Плотников

Московский физико-технический институт (государственный университет)

### Введение

В настоящее время активно ведутся исследования в области активных методов управления потоком. Эти методы основаны на внесении в течение и, в частности, в пограничный слой, дополнительной кинетической энергии. В перспективе такие системы могут быть использованы для предотвращения отрыва потока, уменьшения шума и т.п. Одним из таких методов является использование т.н. «плазменных актуаторов». Он основан на явлении ионного ветра – возникновении упорядоченного течения от коронирующего электрода к контактному. Такие устройства имеют явные преимущества перед своими механическими аналогами – они легко масштабируемы, имеют более простое устройство.

Для прикладных задач аэродинамики наиболее интересна конфигурация, называемая скользящим разрядом (рис. 1) (в зарубежной печати – surface discharge) – в ней слой диэлектрика имитирует поверхность ЛА. В отличие от конфигураций типа «игла – кольцо», «игла – плоскость», данный разряд хуже подходит для теоретического анализа ввиду более сложной геометрии, а также необходимости учитывать заряд, индуцируемый на поверхности диэлектрика (рис. 2).

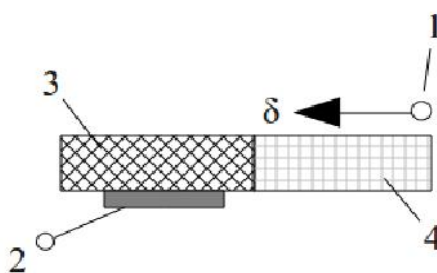


Рис. 1. Схема скользящего РБР.

1 – коронирующий электрод, 2 – контактный электрод, 3 – резистивный барьер, 4 – диэлектрическая подложка

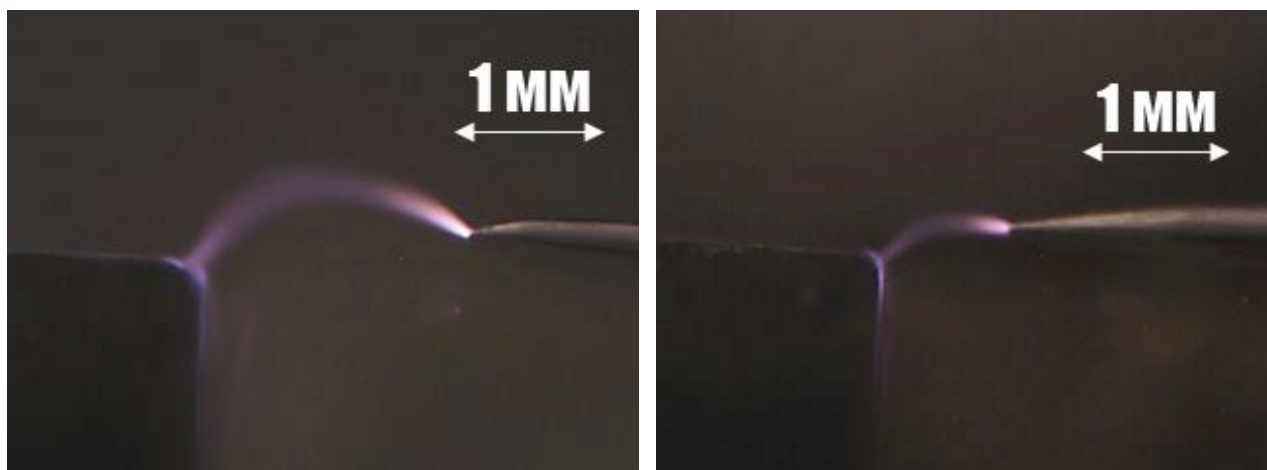


Рис. 2. Скользящий РБР в плоскости, поперечной поверхности, при различных разрядных промежутках

Однако при увеличении напряжения между электродами (что нужно для увеличения мощности устройства), разряд сначала теряет устойчивость, а потом переходит в дуговую фазу. В дуговой фазе ионный ветер отсутствует из-за ионизации по всему каналу разряда. Критическое значение напряжения уменьшается при уменьшении разрядного промежутка. Это приводит к тому, что на разрядных промежутках менее 3 мм коронный разряд практически не реализуется, сразу переходя в дуговую фазу.

Одним из решений является размещения слоя с проводимостью, намного меньшей таковой у металлов. Существует два варианта – размещение барьера из диэлектрика– ДБР, и барьера из плохопроводящего (резистивного) материала – РБР. Т.к. диэлектрики не пропускают постоянный ток, в ДБР приходится использовать питание переменным напряжением.

Скользящий ДБР довольно часто используется, как для изучения физики ДБР, так и для вышеупомянутых задач аэродинамики, как пример – статьи [1], [2].

В данной работе проведено сравнение характеристик скользящих РБР и ДБР и их эффективности для генерации ионного ветра.

Стоит отметить большую разницу между разрядом при положительном коронирующем электроде и при отрицательном. В первом случае носителями тока выступают положительные ионы, во втором – электроны. Причиной этого является высокая напряженность поля около коронирующего электрода, быстро спадающая по мере удаления от него. На расстояниях порядка 1-2 мм электроны прилипают к нейтральным частицам, образуя отрицательные ионы, однако ввиду малости разрядного промежутка в РБР и ДБР этот эффект можно практически не учитывать.

Т.к. сечение взаимодействия электронов с нейтралами намного меньше, чем таковое у положительных ионов, ионный ветер при отрицательном коронирующем электроде и малом разрядном промежутке почти не наблюдается.

Большую роль играет и другой эффект. Из временных характеристик РБР (рис. 3) видно резкую нестационарность тока даже при постоянном питающем напряжении. Причина тому – большое время релаксации заряда в резистивном слое. Заряд, пришедший с коронирующего электрода, не успевает распространиться в контактном электроде, и поэтому «запирает» разряд, что приводит к падению тока на некоторое время. В отрицательном разряде время релаксации заряда значительно меньше, импульсы почти не уходят с линейного участка, и временная характеристика приобретает пилообразный вид.

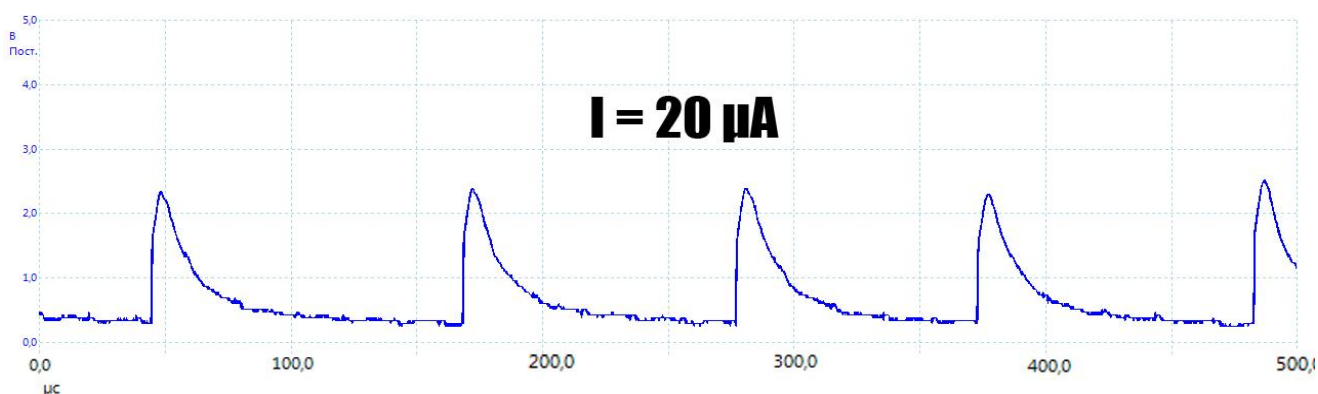


Рис 3. Импульсы, наблюдаемые в положительном РБР

Отсюда следуют два существенных недостатка ДБР перед РБР: переменное напряжение значительно усложняет анализ, т.к. ток даже при постоянном напряжении нестационарен, а также при питании ДБР синусоидальным напряжением половину периода актуатор работает «вхолостую» - при коронирующем катоде ионный ветер не генерируется.

В качестве материала резистивного барьера использовались ферриты, в качестве диэлектрической подложки – кварцевая пластинка.

Для измерений скорости ветра использовалась трубка Пито с датчиком давления Honeywell DCXL 01DCS.

На рис. 4 изображены ВАХ и зависимость скорости ионного ветра от напряжения между электродами. Получить полную картину поля скоростей в разряде, не имея специального оборудования, сложно, поэтому скорости, приведённые на графиках, следует расценивать как характерные для ионного ветра в скользящем РБР.

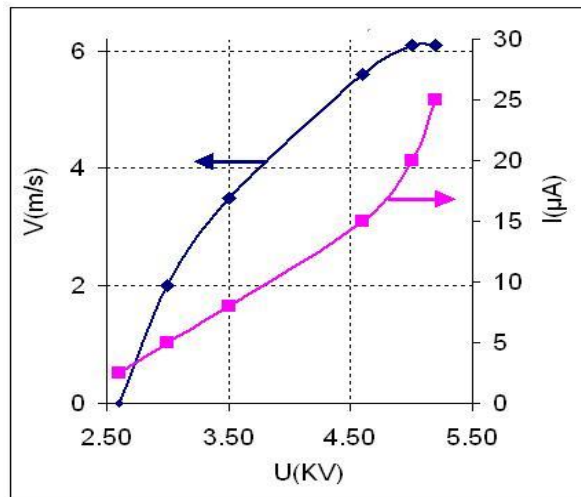


Рис. 4. Типичные ВАХ и скорость ЭВ при положительном РБР

Для сравнения, в работах, использующих ДБР, приведены следующие цифры: максимальная скорость 5,4 м/с при амплитуде 7 кВ (эффективное напряжение – 5) и амплитуде тока 10 мА в [1]; 2,75 м/с при 12 кВ (8.5) в [2]. Видна большая эффективность РБР в задаче генерации ионного ветра.

В задачах практического применения особый интерес будет иметь разряд с несколькими коронирующими электродами, или даже распределенным коронирующим электродом типа бритвы. Были качественно исследованы многоэлектродные разряды (рис 5).

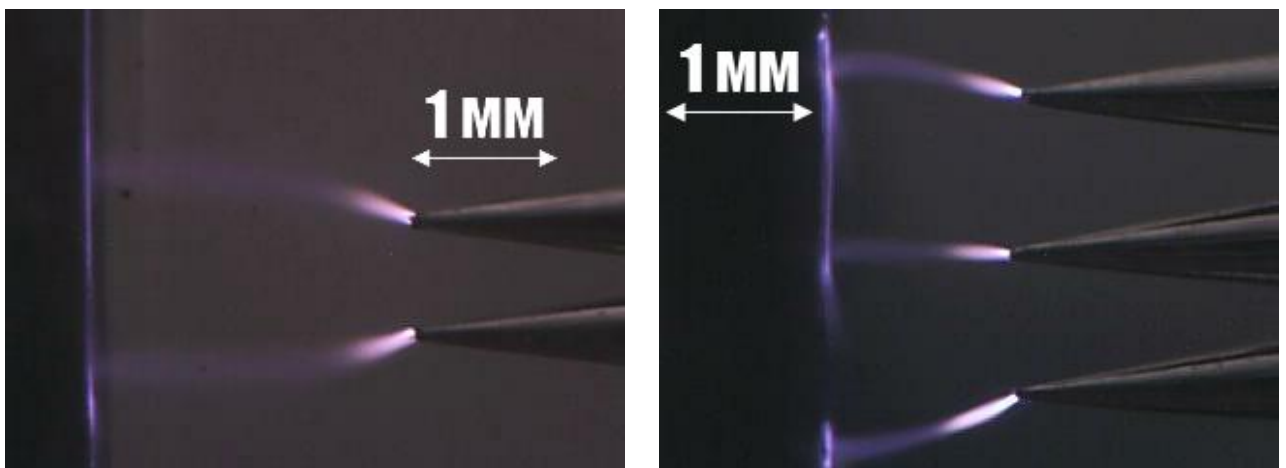


Рис. 5. Скользящий РБР с двумя и тремя иглами

При малом расстоянии между коронирующими электродами токовые шнуры начинают взаимодействовать между собой, что необходимо учитывать при создании устройств управления потоком на основе РБР.

Ввиду того, что из-за магнитного взаимодействия сонаправленные токи притягиваются, а наблюдается отталкивание, можно сделать вывод о превосходстве электрического взаимодействия в РБР над магнитным.

На скользящий РБР оказывает влияние и материал подложки, на которой располагается коронирующий электрод. При замене кварца на стекло (рис. 6), пространственная структура разряда становится более сложной, разряд может распространяться как вблизи поверхности, так и отталкиваясь от нее.

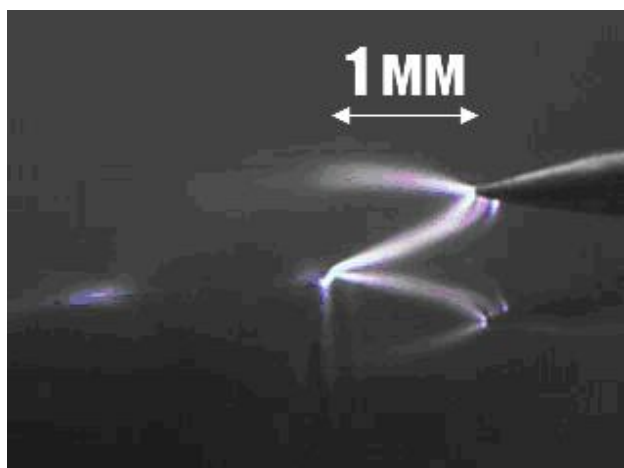


Рис. 6. Положительный скользящий РБР. игла на стекле

Из полученных результатов можно сделать выводы о большей энергетической эффективности РБР в прикладных задачах аэродинамики. Также следует отметить необходимость изучения влияния материала резистивного барьера, диэлектрической подложки и характер взаимодействия токовых шнуров в многоэлектродной конфигурации.

Список литературы:

1. *Поливанов П.А., Вишняков О.И., Сидоренко А.А., Маслов А.А.* Исследование нестационарного поля течения, генерируемого диэлектрическим барьерным разрядом. – Журнал технической физики. – 2012. – том 82.
2. *M. Kotsonis, S. Ghaemi, L. Veldhuis, F. Scarano.* – Measurement of the body force field of plasma actuators. – Journal of Physics D: Applied Physics. – 2011. - № 44.