

03;04;07

Скользящий электродуговой разряд как способ управления траекторией полета летательного аппарата

© В.С. Аксенов, В.В. Голуб, С.А. Губин, В.П. Ефремов,
И.В. Маклашова, А.И. Харитонов, Ю.Л. Шаров

Институт теплофизики экстремальных состояний РАН, Москва
E-mail: golub@ihed.ras.ru

Поступило в Редакцию 6 мая 2004 г.

Изучена динамика развития скользящего импульсного дугового разряда и образования ударных волн на этапе движения лидера и на этапе развития электрической дуги в сверхзвуковом потоке воздуха за ударной волной при начальном давлении 0.09–0.5 ат. Визуализация течения в разрядных промежутках осуществлялась посредством оптической системы, созданной на базе теневого прибора ИАБ-458, световой интерференционной приставки РП-452 и модернизированного рубинового лазера ОГМ-20, дающего 10–15 вспышек от одной накачки.

Показано, что в сверхзвуковом потоке газа за ударными волнами с числами Маха $1.7 < M < 3.4$ происходит устойчивое инициирование скользящего разряда. Ударные волны, образующиеся от скользящего разряда, приводят к отрыву пограничного слоя и повышению давления на поверхности и могут использоваться для изменения газодинамики обтекания поверхности потоком воздуха и управления движением летательного аппарата.

Скользящий электродуговой разряд перемещается от одного электрода к другому вдоль полупроводящей поверхности и завершается разрядом емкостного накопителя с образованием мощной электрической дуги, генерирующей в окружающем пространстве ударную волну [1,2].

Скользящие электрические разряды находят применение в различных электрофизических устройствах, например, таких, как эффективные источники света [1–3]. В то же время скользящий электродуговой разряд может использоваться и для управления траекторией полета летательного аппарата [4–6]. Образование мощной ударной волны на поверхности летательного аппарата при скользящем электрическом разряде изменяет характер обтекания поверхности потоком воздуха

и создает усилие для управления траекторией полета летательного аппарата.

Протяженность (длина межэлектродного промежутка) разряда может изменяться от нескольких миллиметров до метров [7]. Полупроводящим материалом, на поверхности которого генерируется скользкий разряд, может быть углерод, углеродосодержащая керамика и другие полупроводящие материалы. Результаты измерения скорости движения лидера для стержней различной длины из разных материалов в диапазоне изменения напряженности от 40 до 225 kV/m удовлетворительно аппроксимируются линейной зависимостью $\lg v = 2.6951 \cdot \lg E - 10.066$, где $[v] = \text{m/s}$, а $[E] = \text{V/m}$. Если предположить, что скорость движения лидера соответствует скорости идеальной одномерной ударной волны в воздухе, то зависимость избыточного давления на фронте лидера можно аппроксимировать линейной зависимостью $\lg(\Delta P) = 4.55 \cdot \lg E - 20.44$, где $[\Delta P] = \text{at}$, а $E = \text{V/m}$.

Принципиальным является вопрос о возможности устойчивого инициирования скользкого разряда в сверхзвуковом потоке воздуха, в условиях, моделирующих условия полета летательного аппарата со сверхзвуковой скоростью. Известны опыты по созданию высокоскоростного потока плазмы с использованием электродугового разряда в газе, а также и взаимодействию плазмы разряда со сверхзвуковым потоком газа [8]. Однако данные по инициированию скользкого электродугового разряда в сверхзвуковом потоке газа авторам неизвестны.

В работе моделировалось инициирование скользкого разряда на поверхности летательного аппарата путем возбуждения разряда в сверхзвуковом потоке газа за фронтом ударной волны в ударной трубе при пониженном давлении.

Эксперименты проводились на диафрагменной ударной трубе с каналом квадратного сечения $72 \times 72 \text{ mm}$. Длина камеры высокого давления была 1.25 m, а секций низкого давления — 6.7 m. Разрядник располагался в нижней части канала трубы по центру прозрачной секции. Поле зрения составляло $110 \times 69 \text{ mm}$. В качестве толкающего газа применялись воздух и гелий. В камере низкого давления ударной трубы находился воздух. Опыты выполнялись при начальном давлении 0.09–0.5 at для ударных волн с числами Маха $1.7 < M < 3.39$.

Возбуждение разряда осуществлялось при пробое искровых промежутков между электродами и поверхностью полупроводящего стержня из углеродистого графита сечением $2 \times 4 \text{ mm}$ и длиной 68 mm, залитого „заподлицо“ с поверхностью пластины. Расстояние между электродами

равнялось 60 mm. Емкость накопителя составляла 50 μ F, напряжение — 3.1 kV.

Визуализация взаимодействия разряда с ударной волной производилась теневым и интерференционными методами с помощью теневого прибора ИАБ-458, интерференционной приставки и высокоскоростной камеры СФР с использованием в качестве источника света модернизированного рубинового лазера ОГМ-20. За одну вспышку лампы-накачки (энергия накачки ~ 800 J) лазер ОГМ-20М генерирует 10 \div 15 световых импульсов длительностью 50–70 ns с помощью пассивного жидкого затвора (насыщающего фильтра [9]), заполненного слабым раствором фталоцианина ванадила в толуоле.

Кинограмма скользящего разряда в покоящемся воздухе показывает высокую симметричность ударной волны, которая имеет цилиндрическую форму со сферическими торцами.

Кинограммы на рис. 1 и 2 иллюстрируют развитие скользящего разряда за фронтом ударной волны при начальном давлении 0.33 и 0.09 at и скоростях потоков воздуха 394 и 876 m/s соответственно. На кадре 1 рис. 1 виден фронт ударной волны,двигающийся по ударной трубе. Между кадрами 1 и 2 возбуждается скользящий разряд в виде распространяющихся от разных электродов к центру лидеров (плазменных образований). Видно появление в головах лидеров,двигающихся к центру разрядника, отошедших ударных волн. Возможно, даже эти достаточно слабые ударные волны способны нарушить и оторвать пограничный слой в высокоскоростном потоке воздуха. На кадре 2 два лидера продвинулись навстречу друг другу на 22 mm каждый, волны сжатия отошли от головы лидеров на 15 mm. По-видимому, скорость лидера,двигающегося навстречу потоку воздуха (справа налево), мало отличается от скорости лидера,двигающегося по направлению потока воздуха от противоположного электрода, так как место их встречи находится в центре разрядного промежутка. Следовательно, в этих условиях высокоскоростной поток воздуха не влияет существенно на время замыкания разрядного промежутка. Кадр 3 иллюстрирует замыкание разрядного промежутка плазменным шнуром с образованием мощной ударной волны. Видны ударная волна от электродугового разряда после замыкания дуги при встрече лидеров и область нагретого до высокой температуры газа. В направлении навстречу потоку фронт ударной волны продвинулся на расстояние в 2 раза меньшее, чем в поперечном направлении. На кадре 4 появляется теневая картина

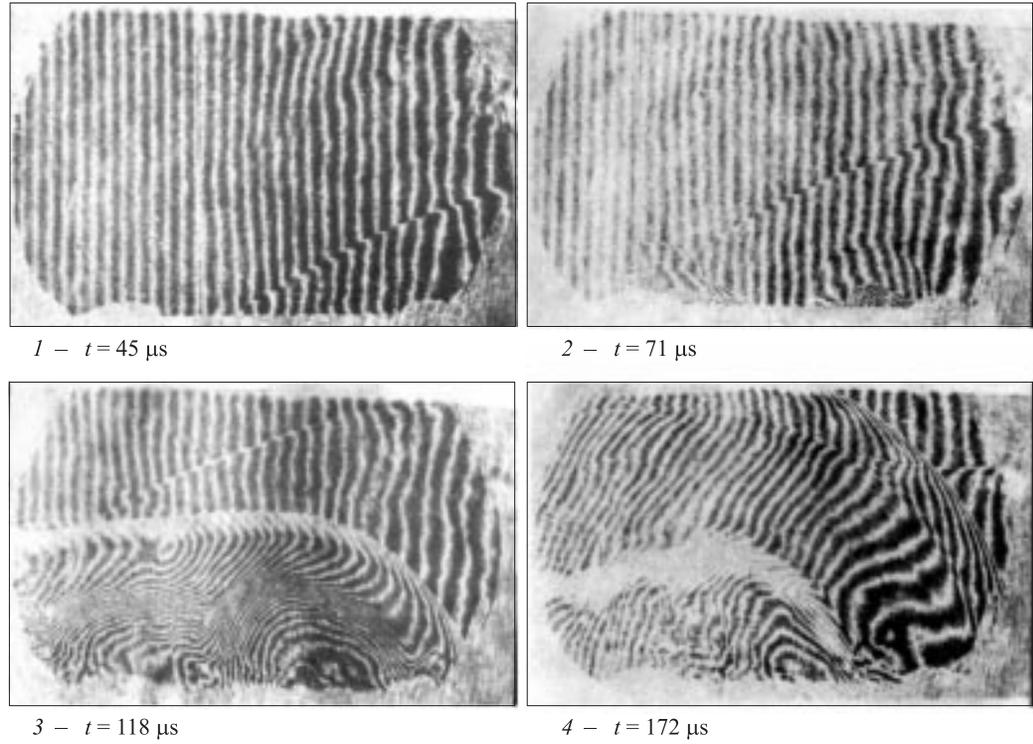
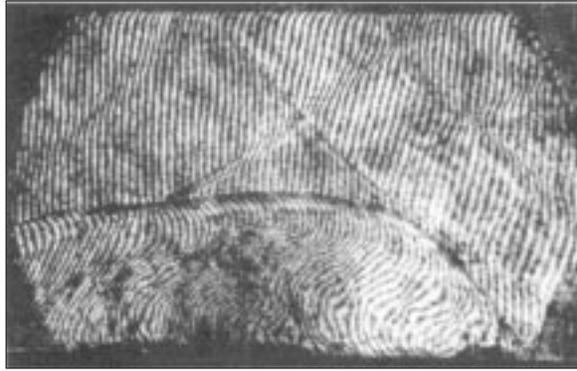
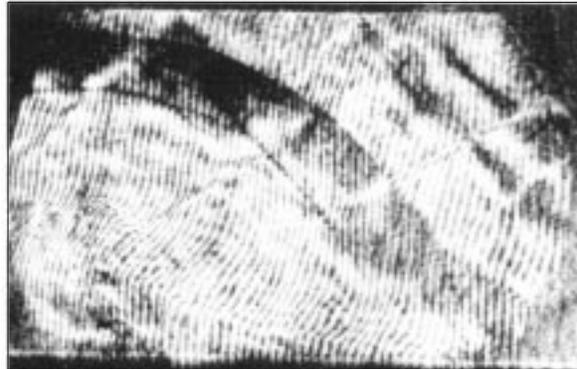


Рис. 1. Кинограмма развития скользящего разряда в сверхзвуковом потоке воздуха за фронтом ударной волны, $M = 1.91$, номер опыта — 1.



1 – $t = 49 \mu\text{s}$



2 – $t = 99 \mu\text{s}$

Рис. 2. Кинограмма развития скользящего разряда в сверхзвуковом потоке воздуха за фронтом ударной волны, $M = 3.39$, номер опыта — 2.

границы нагретого разрядом и холодного воздуха. Область нагретого воздуха сдувается потоком. На кадре 4 ударная волна от разряда отразилась от верхней стенки, а область нагретого газа снесена в левую часть поля зрения.

На рис. 2 приведена кинограмма скользящего разряда за фронтом мощной ударной волны в сверхзвуковом потоке воздуха. На кадре 1 видна ударная волна, формирующаяся от электродугового разряда.

Обычно симметричная форма ударной волны искажена набегающим потоком. На кадре 2 видно, что ударная волна не двигается, а встает навстречу потоку и распространяется только в поперечном направлении.

Проведенные эксперименты свидетельствуют о том, что образующаяся от замыкания дуги ударная волна обладает достаточной интенсивностью и пространственными размерами для нарушения и отрыва воздушного пограничного слоя на поверхности заданного размера. Срыв пограничного слоя приведет к возникновению силы, действующей в этом месте на поверхность. Эту силу можно использовать как управляющую, действием которой можно целенаправленно изменять усилие, воздействующее на поверхность, обтекаемую высокоскоростным потоком воздуха.

Скольльзящий разряд конструктивно легко расположить на любой поверхности и обеспечить его работу с заданной частотой. Образование периодических ударных волн от работающего с определенной частотой скользющего разряда на поверхности летательного аппарата будет вызывать периодическое разрушение пограничного слоя, изменение параметров обтекания поверхности сверхзвуковым потоком воздуха и образование периодического управляющего усилия, действующего на поверхность летательного аппарата.

Выполненные исследования развития скользющего дугового разряда в потоке за ударной волной позволяют сделать следующие выводы.

1. Перед плазменным контактом (лидером), движущимся приблизительно с постоянной сверхзвуковой скоростью, в воздухе образуется присоединенная ударная волна, а после электрического пробоя формируется более мощная ударная волна.

2. Показано, что при начальном напряжении от 2.6 до 3.35 kV происходит устойчивое инициирование скользющего разряда в сверхзвуковом потоке воздуха за фронтом ударной волны с числами Маха от 1.7 до 3.4 с образованием мощной ударной волны при замыкании межэлектродного промежутка плазменным шнуром.

3. Ударные волны, генерируемые в воздухе скользющими электрическими разрядами, по-видимому, могут использоваться для изменения газодинамики обтекания поверхности потоком воздуха и тем самым для управления движением летательного аппарата.

Работа выполнена при частичной поддержке программы Президиума РАН № 20 за 2003 г.

Список литературы

- [1] *Зобов Е.А., Соколов В.Г., Сидоров А.Н.* и др. // ПМТФ. 1980. № 2. С. 19–22.
- [2] *Фазизов Э.А., Ахмеров Н.А., Глуши Г.Г.* и др. // ТВТ. 1984. Т. 22. № 4. С. 655–660.
- [3] *Физика быстро протекающих процессов* / Под ред. Златина Н.А. Т. 1. М.: Мир, 1971.
- [4] *Аксенов В.С., Губин С.А., Ефремов В.П.* и др. // XVIII Международная конференция „Физика экстремальных состояний вещества — 2003“ / Под ред. Фортова В.Е. и др. Черногловка: ИПХФ РАН, 2003. С. 103.
- [5] *Аксенов В.С., Губин С.А., Голуб В.В.* и др. The fifth workshop on magnetoplasma aerodynamics for aerospace applications. 2003.
- [6] *Аксенов В.С., Голуб В.В., Губин С.А.* и др. // Тезисы научно-координационного совещания-симпозиума „Проблемы физики ультракоротких процессов в сильнонеравновесных средах“ / Под ред. Ефремова В.П., Нормана Г.Э. и др. Черногловка: ИПХФ РАН, 2003. С. 25.
- [7] *Базелян Э.М., Райзер Ю.П.* Искровой разряд. Учебное пособие: Для вузов. М.: Изд-во МФТИ, 1997. 320 с.
- [8] *Лосев С.А.* Газодинамические лазеры. М.: Наука, 1977. 336 с.
- [9] *Квантовая электроника* / Под ред. Ахманова С.А., Жаботинского М.Е. и др. М.: Сов. энциклопедия, 1989. 432 с.