

Math-Net.Ru

All Russian mathematical portal

Yu. G. Basov, V. I. Roldugin, V. V. Sysun, Discharge
in an electromagnetic shock-tube with preionization
of xenon,
TVT, 1982, Volume 20, Issue 3, 429–432

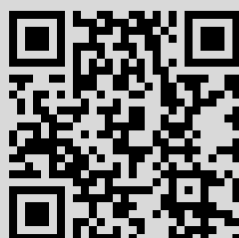
<https://www.mathnet.ru/eng/tvt6326>

Use of the all-Russian mathematical portal Math-Net.Ru implies that you
have read and agreed to these terms of use
<https://www.mathnet.ru/eng/agreement>

Download details:

IP: 18.97.9.172

April 18, 2025, 10:32:05



УДК 533.9.07

РАЗРЯД В ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ УДАРНОЙ ТРУБЕ С ПРЕДВАРИТЕЛЬНОЙ ИОНИЗАЦИЕЙ КСЕНОНА

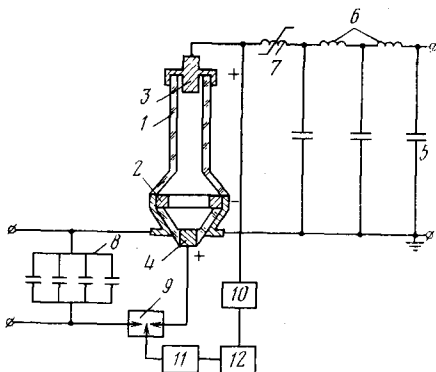
Басов Ю. Г., Ролдугин В. И., Сысун В. В.

Предварительная ионизация ксенона, создающая градиент давления между разрядной камерой ускорителя плазмы и камерой расширения в электромагнитной ударной трубе, не способствует повышению скорости фронта движущегося в камере расширения потока плазмы, но увеличивает скорость формирования светящегося тела и выход оптического излучения. Уменьшение градиента давления независимо от увеличения температуры газа в условиях эксперимента приводит к понижению этой скорости.

Эффект ускорения ударных волн в газе с градиентом плотности теоретически рассмотрен в [1, 2] и экспериментально наблюдался в [3, 4]. В [4] удалось получить увеличение скорости фронта ударной волны в четыре раза (от 5 до 20 км/с) при движении ее в газе с отрицательным градиентом плотности частиц.

В данной работе приводятся экспериментальные результаты исследования влияния предварительной ионизации ксенона на динамику движения потоков газоразрядной плазмы в электромагнитной ударной трубе с коническим ускорителем плазмы.

Рис. 1. Схема экспериментальной установки: 1 — камера расширения электромагнитной ударной трубы; 2 — 4 — соответственно кольцевой, вспомогательный и центральный электроды; 5 — конденсаторы LC-длинной линии; 6 — индуктивности; 7 — насыщающий дроссель; 8 — высоковольтный емкостный накопитель; 9 — разрядник; 10 — блок зажигания предварительного разряда; 11 — блок зажигания разряда; 12 — блок длительности; 12 — блок управления разрядами



Эксперименты проводились с применением устройства, показанного на рис. 1. Для создания градиента плотности частиц между конической разрядной камерой ускорителя с диаметрами 1 и 2 и длиной 3 см и объемом газа в трубе 1 с внутренним диаметром 1,05 и длиной 12 или 13 см между кольцевым 2 и вспомогательным 3 электродами осуществлялся разряд конденсаторной батареи 5 ($C=420$ мкФ, $L \approx 120$ мкГ, $U=1-2$ кВ), формирующей близкий к прямоугольному импульс длительностью ~ 400 мкс. Через 36 мкс после начала вспомогательного разряда в трубе, когда часть ксенона вытеснялась в ускоритель, производился короткий разряд малоиндуктивной конденсаторной области 8 ($C=12$ мкФ, $L=0,4$ мкГ, $U=10-30$ кВ) через воздушный разрядник 9 между электродами 2 и 4. Когда требовалась предварительная ионизация ксенона без создания градиента плотности, разряд осуществлялся между вспомогательным и центральным электродами. При этом менялась полярность электродов 2 и 4. Ток и напряжение измерялись с помощью пояса Роговского, омически-емкостного делителя и осциллографа С1-29.

Проведем анализ физических явлений в конической разрядной камере ускорителя, воспользовавшись моделью, согласно которой разрядный ток

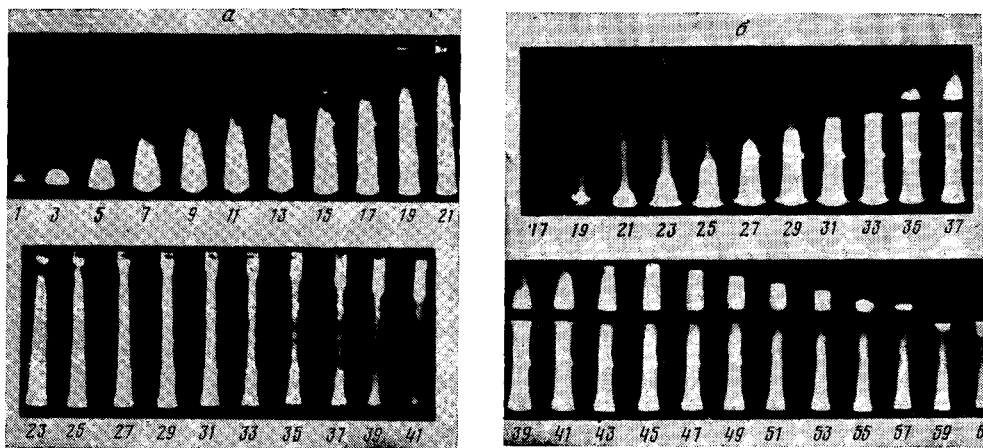


Рис. 2. Покадровые снимки движения плазменных потоков в электромагнитной ударной трубе при создании предварительного разряда для $C=420$ мкФ, $U=1$ (а) и 3 кВ (б) между вспомогательным и кольцевым (а) и центральным (б) электродами. Параметры основного разряда: $C=6$ (а) и 12 мкФ (б), $U=30$ (а) и 20 кВ (б). Скорость съемки $5 \cdot 10^5$ (а) и $2,5 \cdot 10^5$ кадр/с (б)

в камере протекает от центрального катода радиусом R_k к кольцевому аноду радиусом R_a сначала вдоль оси и радиально в плоскости его среза, а затем по обратному токопроводу [5].

Конфигурация разряда, когда сечение канала тока увеличивается от R_k до R_a , обеспечивает ускорение плазмы за счет сил собственно магнитного поля. В этом случае в ускорителе возникает кольцевое поле H_ϕ , причем величина $\mu_0 H_\phi^2/2$ в камере ускорителя больше, чем у среза анода. Разность результирующих сил давления представляет собой ускоряющую магнитную силу F_m .

Согласно уравнению Максвелла и закону Ампера, на кольцевой элемент $dS=2\pi r dr$ среза ускорителя будет действовать сила $dF=\mu_0 I^2 dr/4\pi r$, где I — осевой ток в ускорителе. Интегрируя ее по радиусу от катода до кольцевого анода, получаем силу

$$F_m = \frac{\mu_0 I^2}{4\pi} \ln \frac{R_a}{R_k}, \quad (1)$$

которая приложена ко всей плоскости среза. В пересчете на эквивалентное магнитное давление

$$P = \frac{\mu_0 I^2}{4\pi^2 R_a^2} \ln \frac{R_a}{R_k}. \quad (2)$$

Для $R_k=1$ см, $R_a=2$ см и $I=130$ кА рассчитанная величина $P_m=0,5$ МПа. Она в несколько раз меньше, чем для H -образных электромагнитных устройств [6, 7].

Температура плазмы T в конической камере определялась с помощью ее теоретической зависимости от σ [8]. Удельная электропроводность σ находилась по экспериментально измеренным значениям тока и напряжения для момента времени, когда ток максимальный. Для приведенных выше значений при начальном давлении ксенона $P_0=6,7$ кПа давление газа при $T=2,4$ эВ

$$P_r = N_0 k T (1 + \alpha) \simeq 1,2 \text{ МПа}. \quad (3)$$

Следовательно, в данных экспериментах ускорение потоков плазмы в камеру расширения имеет преимущественно термический характер.

На рис. 2 приведены покадровые снимки развития разряда в электромагнитной ударной трубе для двух типов ее включения. Ударная волна заметна при отражении от вспомогательного электрода лишь для малых энергий предварительного разряда W_n (рис. 2, а, кадр 19). Увеличение температуры с ростом W_n создает условия, когда ударная волна не образуется (рис. 2, б).

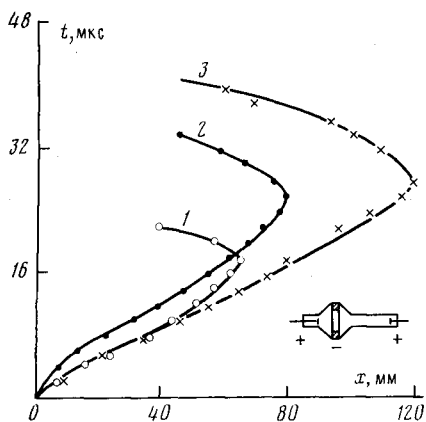


Рис 3

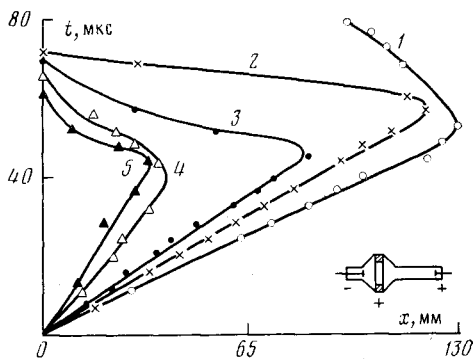


Рис 4

Рис. 3: x, t -диаграмма движения фронтов потоков плазмы в электромагнитной ударной трубе с предварительным разрядом ($C=420$ мкФ, $U=3$ кВ) (2, 3) и без него (1), (2 – без обратного токопровода). Параметры основного разряда: $C=12$ мкФ, $U=15$ кВ

Рис. 4: x, t -диаграмма движения фронтов потоков плазмы в электромагнитной ударной трубе с предварительным разрядом ($C=420$ мкФ; $U=1$ кВ) для различных значений параметров основного разряда ($C=6$ мкФ): 1 – $U=30$ кВ; 2 – 25; 3 – 20; 4 – 15; 5 – 10

Влияние предварительной ионизации ксенона на скорость заполнения плазмой камеры расширения трубы иллюстрирует рис. 3. Предварительный разряд между кольцевым и вспомогательным электродами, вероятно, уменьшает плотность газа в камере расширения и тем самым снижает потери энергии движущейся плазмы на нагрев газа перед фронтом потока, что способствует заполнению плазмой всей длины трубы, хотя и не увеличивает скорости ее фронта. Без предварительного разряда кинетическая энергия потока плазмы быстро расходуется на нагрев холодного газа, и фронт потока плазмы при этом достигает лишь середины трубы. Отсутствие обратного токопровода приводит к изменению скорости фронта потока плазмы, что, вероятно, связано с менее быстрым выделением мощности в разряд из-за увеличения индуктивности, а также за счет радиационных потерь энергии расширяющейся плазмы ускорителя (обратный токопровод выполнялся со светоотражающей поверхностью), хотя и не так сильно, как в [7].

Увеличение энергии предварительного разряда повышает скорость фронта потока плазмы и уменьшает время заполнения ею камеры расширения.

Противоположные результаты получены, когда предварительный разряд осуществляется между вспомогательным и центральным электродами. В этом случае с увеличением энергии предварительного разряда уменьшаются скорость движения фронтов потоков плазмы и расстояние, проходимое ими в трубе. Этот эффект объясняется тем, что при повышении энергии предварительного разряда уменьшается соотношение между давлением газа в камере расширения и давлением газа в разрядной камере ускорителя в момент осуществления короткого импульса, хотя температура в камерах расширения возрастает. Следовательно, изменение градиента давления газа между разрядной камерой и трубой в большей степени сказывается на скорости фронта потока плазмы, чем увеличение температуры газа в трубе.

Повышение энергии короткого разряда (рис. 4) от 300 (кривая 5) до 2700 Дж (кривая 1) увеличивает скорость потока плазмы от $\sim 0,8$ до 4,3 км/с.

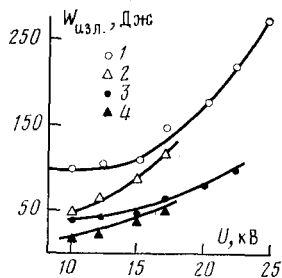


Рис. 5. Зависимость энергии излучения плазмы в электромагнитной ударной трубе от напряжения разряда малоиндуктивного контура ($C=12$ мкФ, $U=15$ кВ) с предварительным разрядом ($C=420$ мкФ, $U=1$ кВ) (1, 2) и без него (3, 4) для λ : 1, 3 – 185–2600 нм; 2, 4 – 185–380

Результаты, приведенные на рис. 2—4, получены для начального давления ксенона $P_0=6,7$ кПа. Его уменьшение приводит к росту скорости фронта потока плазмы, а повышение давления — к ее снижению. Однако соотношение всех наблюдаемых эффектов и качественная картина развития разряда остаются прежними.

Излучательные характеристики плазмы в электромагнитной ударной трубе с предварительной ионизацией газа и без нее исследовались с помощью радиационного термозлемента ЛЭТИ и светофильтра БС-8. На рис. 5 приведена зависимость энергии излучения плазмы электромагнитной ударной трубы от напряжения разряда для $P_0=6,7$ кПа при включении электродов трубы по схеме рис. 1. Предварительная ионизация ксенона разрядом с энергией 210 Дж приводит к увеличению скорости формирования светящегося тела и росту интенсивности излучения в значительно большей степени, чем повышение на эти же 210 Дж энергии основного короткого разряда. Это, вероятно, связано с тем, что предварительный разряд способствует увеличению глубины проникновения светящейся области в камеру расширения. Тем самым увеличиваются длина столба излучающей плазмы и радиационные потери из нее.

Москва

Поступила в редакцию
8.VII.1981

ЛИТЕРАТУРА

1. Зельдович Я. Б., Райзер Ю. П. Физика ударных волн и высокотемпературных гидродинамических явлений. М.: Наука, 1966.
2. Войтенко А. Е., Любимов М. А., Соболев О. П., Сынах В. С.— Препринт ИЯФ АН СССР, № 14—70, 1970.
3. Ludvik S., Messerle H. K. Shock Tubes Proc. VIIth Int. Shock Tubes Symp. Toronto. 1969, Toronto, p. 201, 1970.
4. Войтенко А. Е., Любимов М. А., Соболев О. П.— ЖТФ, 1972, т. 42, с. 111.
5. Hügel H., Kruehle G., Peters T.— AIAA J., 1967, v. 5, No. 3, p. 551.
6. Сысун В. В., Басов Ю. Г., Скворцов Б. В., Ролдугин В. И.— ТВТ, 1971, т. 9, № 2, с. 257.
7. Сысун В. В., Басов Ю. Г., Ролдугин В. И.— ТВТ, 1975, т. 13, № 1, с. 157.
8. Басов Ю. Г., Иванов В. В., Макаров В. Н., Нархова Г. И.— Оптика и спектроскопия, 1975, т. 38, № 3, с. 608.