

задержки зависит как от приложенного напряжения, так и от энергии светового излучения (дозы) попадающего на структуру при засветке. Такая зависимость приведена на вставке рис. 2 для длины волны падающего на структуру излучения 0.9 мкм.

Таким образом, описанные анизотипные ПДП-структуры благодаря наличию внутренней обратной связи являются простейшими функциональными устройствами и могут использоваться в различных оптико-электронных устройствах: линии задержки, фотоприемники с внутренним усилением, релаксационные генераторы и т.д. При формировании таких структур в одной базовой области возможно путем осуществления между ними объемной связи реализация более сложных функциональных схем: нейристорных линий, нейроконов и т.д.

С п и с о к л и т е р а т у р ы

- [1] В у л ь А.Я., С а ч е н к о А.В. // ФТП. 1983. Т. 17. В. 8. С. 1361-1376.
- [2] М а н а с с о н В.А., Б а р а н ю к В.Б., Т о в с т ю к К.Д. // ФТП. 1987. Т. 21. В. 6. С. 1047-1050.
- [3] М а н а с с о н В.А., К о м и с с а р о в Г.П. // ФТП. 1988. Т. 22. В. 7. С. 1322-1324.
- [4] С т а ф е е в В.И. // Радиотехника. 1971. Т. 26. № 10. С. 5-12.

Черновицкий
государственный университет

Поступило в Редакцию
21 апреля 1989 г.

Письма в ЖТФ, том 15, вып. 15 12 августа 1989 г.
03; 04

РЕАКТИВНОЕ ДВИЖЕНИЕ ПРИ ГАЗОВОМ РАЗРЯДЕ ОТ ВНЕШНЕГО ТОКОПОВОДА

Г.А. А с к а р ь я н, И.В. Г о с у д а р е в,
Л.Д. К л е б а н о в

В последнее время усилился интерес к исследованию нетрадиционных видов реактивного движения при внешнем подводе энергии [1, 6], например, лучами СВЧ [1, 3, 5, 12], лазеров [2, 4, 5, 7, 13-15]. При этом лучевой разряд у торца тела или в камере внутри, увеличивая скорость истечения рабочего вещества, может вызвать тягу, достаточную для ускорения небольших тел (например, частицы малых размеров при светореактивном [2, 4, 13, 14] ускорении могут приобрести космические скорости).

Известны также многочисленные работы по рельсотронному ускорению небольших тел [16-19] под давлением токового газового разряда, прижимающегося к торцу ускоряемого тела. С помощью

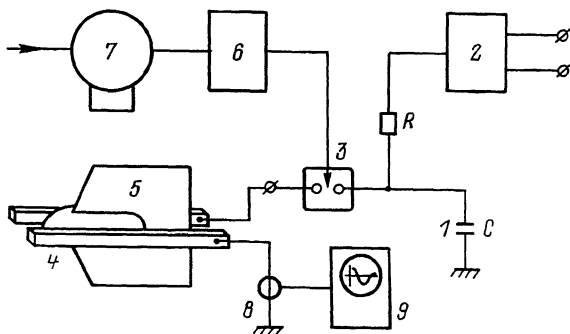


Рис. 1. Схема установки. 1 - батарея конденсаторов, 2 - источник высокого напряжения, 3 - разрядник, 4 - токоподводы, 5 - ускоряемое тело с тонким ножевым оперением для устранения разрядов вблизи тела, 6 - схема задержки, 7 - скоростная фотокамера ВФУ, 8 - пояс Роговского, 9 - осциллограф.

такого ускорения удается, например, ускорить тела с массой от долей до десятков грамм до космических скоростей с набором удельного импульса $P/\xi \approx (1-3) \cdot 10^3$ гсм/скДж. Эффективность и предельные скорости могут сильно зависеть от конструкции ускорителя, в частности от типа рельсотрона (открытого - с открытыми рельсами или закрытого - с диэлектрическими стенками, создающими вместе с рельсами канал ускорителя).

Мы провели сравнительные исследования различных видов рельсотронного газоразрядного ускорения и показали явное преимущество реактивного, использующего газовый разряд внутри тела при внешнем токоподводе.

Исследование удельного импульса позволяло нам ограничиться использованием малой установки с энергозапасом модуля батареи $\xi = C U^2/2 \approx 2$ кДж, при этом ускорялись тела с интересующими нас массами M 1-20 г до скоростей $u \approx (3 \cdot 10^3 - 3 \cdot 10^2)$ см/с. Перерасчет на большую батарею для обычного рельсотронного ускорения производился согласно соотношению $P \approx A\xi$ при расчетном $M u^{2/2} \ll \xi$ (ср. [18]).

Схема установки дана на рис. 1. Батарея из 10 конденсаторов с общей емкостью $C = 1$ мФ, заряжаемая источником (1) до напряжения (2-3) кВ, подключалась через разрядник (3) на токопроводящие элементы (4), между которыми помещалось ускоряемое тело (5). Разрядник инициировался импульсом от схемы задержки (6), запускаемой от высокоскоростного фоторегистрирующего устройства ВФУ. Ток измерялся поясом Роговского (8), дающего импульс на осциллограф с памятью (9). Максимальная сила тока доходила до 10 кА при периоде $T \approx 1$ мс быстрозатухающих колебаний.

Основные измерения были выполнены с открытым рельсотроном. Рельсы - медные стержни круглого сечения диаметра 1,2 см с расстоянием между рельсами 2 см.

Иницирование разряда локализовалось в нужном месте тонкой проволочкой, металлизацией или металлическим порошком на диэлектрической пластине.

Ускоряемое тело из фторопласта делалось сплошным (при ускорении торцевым разрядом) или снабженным поперечным каналом для тока и паров рельсов, внутренней камерой и дюзой для выброса реактивной струи.

Импульс, переданный телу, определялся по удару по балластическому маятнику, скорость тела определялась также по прогибу h траектории полета тела на пути L : $u \approx \sqrt{g/2h} L$ или по кадрам ВФУ.

Возможны различные виды ускоряющего воздействия.

1. Сила (JH) магнитного давления от взаимодействия тока J с магнитным полем H тока по рельсам.
2. Газокинетическое давление факела у торца тела.
3. Реактивное истечение из тела при нагреве газа током разряда. В этом случае в качестве рабочего вещества могут быть использованы воздух с засосом сбоку или спереди (аналог засосного или прямоточного воздухомоторного двигателей), пары металла токоподводов, образуемые в дуговых пятнах с последующим подогревом током или паров самого тела.

Эти механизмы были опробованы, при этом выявилось характерное поведение разряда и различие эффективности ускоряющего воздействия.

1. Импульс P воздействия плазмы разряда существенно превосходит импульс от силы взаимодействия (JH) $F_{JH} = \frac{1}{c} JH l_1 = \frac{1}{c^2} J^2 \frac{l_1}{l_2} \rightarrow 10^{-2} J_A^2 \frac{l_1}{l_2}$, где J_A - ток в амперах, l_1 - длина газоразрядного тока, l_2 - расстояние между осями рельсов $l_1/l_2 \approx \frac{1}{2}$ и для наших условий $P_{JH} = F_{JH} T \approx 250$ гсм/с. Измеренный импульс от разряда на торце тела $P \approx 10^3$ гсм/с, если приняты меры для устранения прорыва разряда вперед.

2. Реактивный импульс оказался существенно больше $P_{реак} \approx 5P \approx (4-5) \cdot 10^3$ гсм/с, если приняты меры для предотвращения переноса струей разряда на торец.

3. Существует простой способ фиксации положения разряда с помощью тонких ножей-подкрылков по бокам и у торца тела, не позволяющих замкнуться газоразрядному току в нештатном месте.

4. В закрытых рельсотронах (токоподводы с боковыми крышками из диэлектрика - плексигласа или гетинакса) эффективность ускорения немного возросла, но был замечен с помощью ВФУ и по следам дуговых пятен на рельсах уход разряда далеко назад от торца тела и самопроизвольные пробои по поверхности диэлектрика из-за металлизации при конденсации паров токоподводов. Такие закрытые рельсотроны обладают еще одним недостатком - образованием газовой пробки из-за сгребания газа перед телом (эквивалент увеличения массы или противодавления) при ускорении в атмосфере.

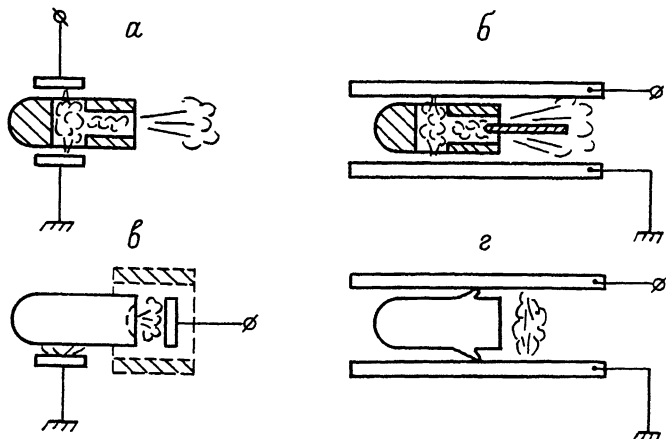


Рис. 2. Схема вариантов ускорения. а – ракета с поперечными токоподводами, б – ракета с продольными токоподводами и торцевым ножом для подавления пробоя у торца, в – отбрасывание тела от токоподвода парами металла и воздуха и абляцией при испарении тела и токоподвода. Пунктиром нарисована надеваемая трубка, г – ускорение с разрядом на торце.

В этом отношении реактивное ускорение не только выгодно из-за хорошей направленности струи и большей скорости истечения из-за большего подогрева и разгона в сопле (что важно для открытого рельсотрона), но и из-за ослабления газовой пробки в прямоточном реактивном режиме. Отметим различие в динамике набора скорости. Когда масса тела уходит в реактивное движение, скорость тела по формуле Циолковского $u = v_{ист.} \ln(M_0/M)$. В случае внешней подпитки массы (сбоку, спереди) уходящей после нагрева в реактивную струю с приходом (расходом) \dot{m} массы в единицу времени

$$M_0 \frac{du}{dt} = \dot{m} (v_{ист.} - u); \quad \text{т.е.} \quad u = v_{ист.} (1 - e^{-\dot{m}t/M_0})$$

при $u < v_{ист.}$, что дает ограничение достижимой скорости, но большую ускоренную массу. Обычно в рельсотронном разряде температуры 10^4 К и скорости истечения $v_{ист.} \approx \sqrt{\frac{2c^2}{\gamma-1}} \approx 4 \cdot 10^5$ см/с для воздуха и $v_{ист.} \approx 10^6$ см/с для водорода, т. е. в этом диапазоне скоростей реактивное ускорение по эффективности превосходит обычное с разрядом на торце. Поэтому оно может быть использовано для стартового или первоэтапного ускорения, после которого начнется обычное рельсотронное. Например, сочетание реактивного

и (потом) абляционного ускорения даст $u = u_{\text{ист}} \left(1 + \ln \frac{M_0}{M}\right) \approx 2u_{\text{ист}}$ - скорость, в два раза превышающую только абляционную при $M \approx M_0/e$.

В ряду примеров стартовых ускорения были опробованы показанные на рис. 2 варианты ускорителей: а) с поперечными токоподводами, допускающими секционированное включение и самовключение; б) с продольными токоподводами - ракета с хвостовым ножом, подавляющим переброску разряда назад; в) с торцевым давлением паров дуги (в дуге испарялось 0.3 г. электрода), эффективность выброса сильно возрастала при надевании даже мягкого кожуха (показан пунктиром) на тело и электрод; г) с разрядом на торце (на корпусе тела наструги, препятствующие переброске разряда вперед). Максимальные импульсы $\rho \approx (3-5) \cdot 10^3$ гсм/с кДж были получены в случаях б) и в) и меньше $\rho \approx 0.5 \cdot 10^3$ гсм/с кДж в случаях а) и г).

Проведенные эксперименты проясняют физику, позволяют повысить эффективность ускорения и демонстрируют большие возможности фиксации и управления разрядами и усиления их действия.

С п и с о к л и т е р а т у р ы

- [1] Циолковский К.Э. Труды по реактивной технике. М.: Огиз, 1947. 189 с.
- [2] Аскарьян Г.А., Мороз Е.М. // ЖЭТФ. 1962. Т. 43. № 6. С. 2319.
- [3] Schaad J.L., Moriarty J.J. // XVI Intern. Astronaut. Congress. Athens. 1965. V. 5. P. 173.
- [4] Аскарьян Г.А., Рабинович М.С., Савченко М.М., Степанов В.К., Студенов В.Б. // Письма в ЖЭТФ. 1967. Т. 5. С. 258.
- [5] Kantrowitz A.R. // Aeronautics and Astronautics. 1971. V. 9. P. 35.
- [6] Коробейников В.П. // Инж. физ. ж. 1973. Т. 25. С. 1121.
- [7] Perri A.N., Weiss R.F. // Appl. Phys. Lett. 1972. V. 22. P. 79.
- [8] Барчуков А.И., Бункин Ф.В., Конов В.И., Прохоров А.М. // Письма в ЖЭТФ. 1976. Т. 23. С. 273.
- [9] Агеев В.П., Барчуков А.И. и др. // Письма в ЖТФ. 1976. Т. 2. С. 1032.
- [10] Бункин Ф.В., Прохоров А.М. // УФН. 1975. Т. 119. С. 425.
- [11] Аскарьян Г.А., Дацкевич Н.П., Карлов Н.В., Кононов Н.Н., Кузьмин Г.П., Манзон Б.М. // Квантовая электроника. 1978. Т. 5. № 1. С. 192.
- [12] Батанов Г.М., Коссы И.А., Рабинович М.С. // Письма в ЖТФ. 1979. Т. 5. № 7. С. 432.

- [13] Аскарьян Г.А., Тарасова Н.М. // Письма в ЖТФ. 1980. Т. 6. № 11. С. 656.
- [14] Аскарьян Г.А., Манзон Б.М. // Физика плазмы. 1981. Т. 7. № 2. С. 255.
- [15] Ageev V.P., Barschukov A.I., Bunkin F.V. // Acta Astronautica. 1981. V. 8. N 5-6. P. 625.
- [16] Sawte D.R. // AIAA Journal. 1970. V. 8. N 7. P. 1240.
- [17] Ingebbergs E.B., Shriver E.L. // AIAA Journal. 1975. V. 13. N 8. P. 1024.
- [18] Hawke R.S., Brooks A.L., Fowler C.M., Peterson D.R. // AIAA Journal. 1982. V. 20. N 7. P. 978.
- [19] Швецов Г.А., Титов В.М., Башкатов Ю.Л., Стадниченко И.А., Орлов А.В. Труды третьей Межд. конф. по генерации мегагаусных магнитных полей и родственным экспериментам. Новосибирск, 13-17 июня 1983. М.: Наука, 1984, с. 171.

Поступило в Редакцию
31 декабря 1988 г.
В окончательной редак-
ции 25 апреля
1989 г.