

рицательных чисел возможно применение дополнительной по основанию два арифметики; использование третьего пространственного измерения и цилиндрической линзы в выходной плоскости нелинейного кристалла позволит осуществить скалярное произведение векторов с многомерными компонентами.

С п и с о к л и т е р а т у р ы

- [1] Goutzoulis A.P. // Appl. Opt. 1984. V. 23. N 22. P. 4095-5001.
- [2] Guilfoyle P.S. // Opt. Eng. 1984. V. 23. N 1. P. 20-24.
- [3] Петрунькин В.Ю., Раковский В.Ю., Щербаков А.С. Тезисы III Всес. конф. по вычислительной оптоэлектронике, Ереван, 1987, ч. 2, с. 236-237.
- [4] Eichman G., Li Y., Ho P.P., Alfano R.R. // Appl. Opt. 1987. V. 26. N 14. P. 2726-2733.

Ленинградский политехнический институт им. М.И. Калинина

Поступило в Редакцию
7 февраля 1989 г.

Письма в ЖТФ, том 15, вып. 8

26 апреля 1989 г.

04; 09

ПЛАЗМЕННО-ФАКЕЛЬНОЕ ПРЕОБРАЗОВАНИЕ МОЩНОГО СВЧ ИЗЛУЧЕНИЯ И ЭНЕРГОПИТАНИЕ КОСМИЧЕСКИХ СТАНЦИЙ

Г.А. Аскарьян, Г.М. Батанов,
И.А. Коссый

Проблема передачи и преобразования СВЧ энергии занимает ведущее место в энергетике настоящего и будущего (см. [1-2]).

Недавно был предложен и проверен экспериментально новый плазменно-факельный преобразователь (ПФП) мощного СВЧ излучения в ток [3-4], позволяющий вести эффективное преобразование на столь высоком уровне мощности, на котором старые преобразователи не могут быть использованы. В основе ПФП лежат процессы сильного нагрева плазмы факела, ускорения электронов и их выброса из плазмы при рождении электрической дуги у электрода, касающегося плазмы (см. рис. 1). Было показано, что КПД преобразования возрастает при увеличении плотности потока, и в дециметровом диапазоне длин волн были получены КПД $\approx 20\%$ и токи больше кА при мощностях потока несколько МВт.

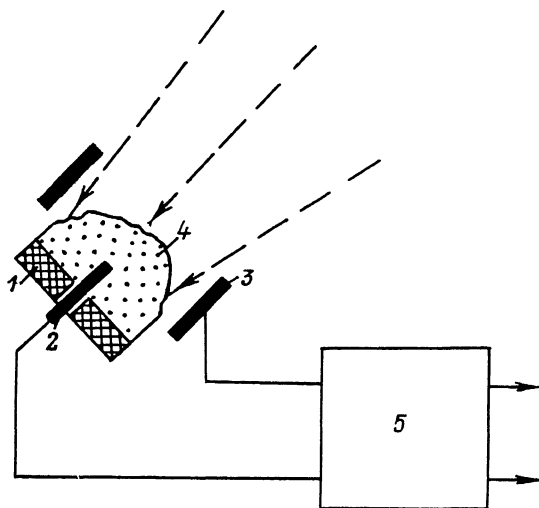


Рис. 1. Плазменно-факельный преобразователь. 1 - диэлектрическая пластина, 2 - эмитирующий электрод, на котором образуется электрическая дуга, 3 - токосъемные электроды, 4 - облако плазмы, на которое действует поток радиоизлучения, 5 - устройство для накопления или потребления энергии.

Возможность передачи большой энергии за ограниченный отрезок времени на большом уровне мощности и большом уровне плотности мощности позволяет осуществить прием и передачу на больших скоростях и небольших размерах приемно-преобразовательной секции, что может оказаться полезным для энергоподпитки быстролетающих спутников и космических станций.

Проблема импульсной подачи энергии на космические объекты, летящие на сравнительно небольших высотах, встречается в различных ситуациях космонавтики и высотной авиации. Общим в этих ситуациях является малое время энергозапитки, что связано с малым временем пролета объекта над питающей станцией - комплекса антенн - в случае СВЧ подпитки или лазерного комплекса - при световой передаче энергии. В дальнейшем мы ограничимся СВЧ подпиткой, учитывая трудности передачи световой энергии с земли из-за облачности.

При обеспечении наземного слежения его время не превышает $t \approx \sqrt{8RH}/v$, где R - радиус земной поверхности, H - высота полета, v - скорость полета. Например, для $R \approx 6400$ км; $H \approx \approx 10^2$ км и $v \approx 10$ км/с получим $t \approx 10^2$ с. При полной энергии подпитки ≈ 10 ГДж необходима средняя мощность 10^2 - 10^3 МВт. Прием и преобразование энергии на таком уровне мощности с помощью известных методов (см., например, [1]) представляет большие трудности. Например, прием с помощью антенн, снабженных

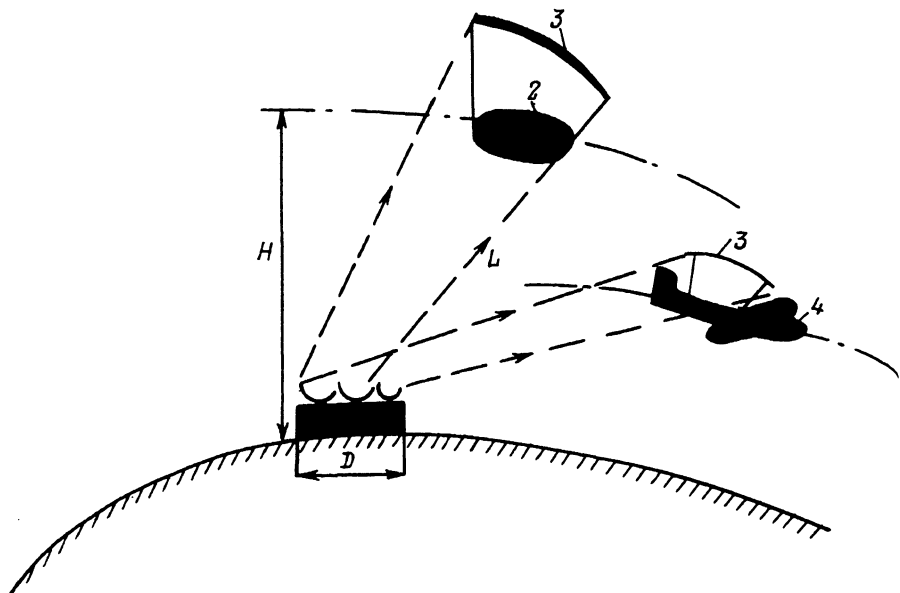


Рис. 2. Схема питания летающих объектов. 1 - питающий антенный комплекс, 2 - спутник, 3 - радиозеркало, 4 - самолет.

полупроводниковыми детекторами, требует комплекса больших размеров с колоссальным числом приемных элементов ввиду того, что они рассчитаны на малые мощности преобразования [2].

Однако на спутнике можно разместить радиозеркало (рис. 2), которое сфокусирует излучение на плазменный преобразователь, работающий как раз при высоких уровнях интенсивности, — такой преобразователь разработан и описан в статьях [3, 4].

Размеры зеркала могут не превышать нескольких метров, и в качестве материала таких радиозеркал могут быть использованы металлические пленки, каркасы из тонких антенн или даже структуры, создающие плазменные зеркала при пробое в мощных СВЧ потоках. Необходимые размеры зеркала α определяются в основном размерами D наземного антенного комплекса, длиной волны λ излучения и расстоянием от питающего комплекса до спутника L : $\alpha \approx L\lambda/D$. Например, при $\lambda \approx 1$ см, $L \approx 300$ км и $D \approx 100$ м получим $\alpha \approx 30$ м.

Остановимся более подробно на преобразователе, работающем на высоком уровне мощности. В его основе лежит генерация мощных термоэмиссионных электронных токов в плазме, возникающей на поверхности среды. Ток возникает из дугового пятна на металлическом электроде, граничащем с плазмой в области максимального нагрева, проходит через плазму и попадает на токосъемный электрод, расположенный перед поверхностью или на стенке камеры. Такой преобразователь работает в вакууме или при пониженных давлениях и после того, как плазма (разряда или фотоионизации) замкнет электроды.

Размеры пятна фокусировки на плазме преобразователя $\rho \approx F\lambda/\alpha$, где F — фокусное расстояние зеркала, α — радиус зеркала, могут быть сделаны достаточно малыми ($\rho \sim \lambda$, т.к. $F \sim \alpha$), что дает большие плотности потока СВЧ излучения, падающего на плазму, и высокие значения термоэмиссионных потенциалов и токов. Экспериментально при длине волны 16 см достигнуты величины токов 0.5 кА и потенциалов 10 кВ при уровне мощности 5 МВт. При длине волны 8 мм достигнуты КПД преобразования 5% (мощность излучения 0.1 МВт, ток 50 А, напряжение 0.1 кВ). В сантиметровом диапазоне ($\lambda = 2.4$ см) при мощностях до 0.5 МВт достигнуты КПД 15%, токи 0.3 кА и напряжения 0.2–0.4 кВ. Экспериментальные данные показывают, что более высокий КПД преобразования для см и дсм диапазона длин волн по сравнению с мм волнами связан с различиями в энергетических спектрах электронов, эмитированных плазменным факелом. Для длинноволнового излучения преобразование определяется быстрыми электронами, тогда как в коротковолновом диапазоне — тепловыми электронами [4]. Однако с ростом интенсивности излучения W КПД преобразования для мм волн растет как $W^{1/3}$. Предельные КПД преобразования для теплового и ускорительного механизмов ожидаются на уровне 40–50%. В случае подпитки спутника, как мы видим, необходимы данные о КПД на уровне интенсивностей 10–100 МВт/см².

В случае необходимости увеличения потенциалов возможно прерывистое возбуждение токов с использованием трансформаторов или последовательное соединение нескольких преобразователей.

Электрическая энергия может быть накоплена в индукционном, сверхпроводящем, электромеханическом, электрохимическом или др. накопителях. Возможна также электрическая или прямая СВЧ накачка активных сред лазера, установленного на спутнике.

Отметим, что возможна также импульсная подпитка энергией пролетающих самолетов или стартовых, тормозных или управляющих ракетных двигателей [5, 6] космических аппаратов.

Рассмотрим в заключение обратную задачу — импульсный съем энергии со спутника, который за длительное время адаптировал солнечное излучение (см. рис. 3).

Время оборота вокруг Земли $T \approx 2\pi R/v \approx 1$ час, за это время спутник принимает энергию Солнца $Q_1 \approx SIT$, где S — площадь приемных антенн, I — плотность потока солнечного излучения. Примем $I \approx 1.0$ кВт/м² и $S \approx 10^2$ м², тогда получим $Q_1 \approx 1.0$ ГДж. Такую энергию спутник может через каждый оборот выгрузить на приемную станцию, причем станция должна иметь площадь приема с размером пятна $D \approx \lambda H/\alpha \sim 10^{-3}, 10^2$ км $\approx 10^2$ м. Принять такую энергию могут только системы с большой стойкостью, т.к. плотность потока кВт/см² заведомо превышает плотности, сжигающие полупроводниковые преобразователи, используемые в антеннах в настоящее время.

На приведенных примерах мы видим, что использование компактных плазменных преобразователей, работающих на высоких уровнях мощности, во многом упрощает и удешевляет решение насущных

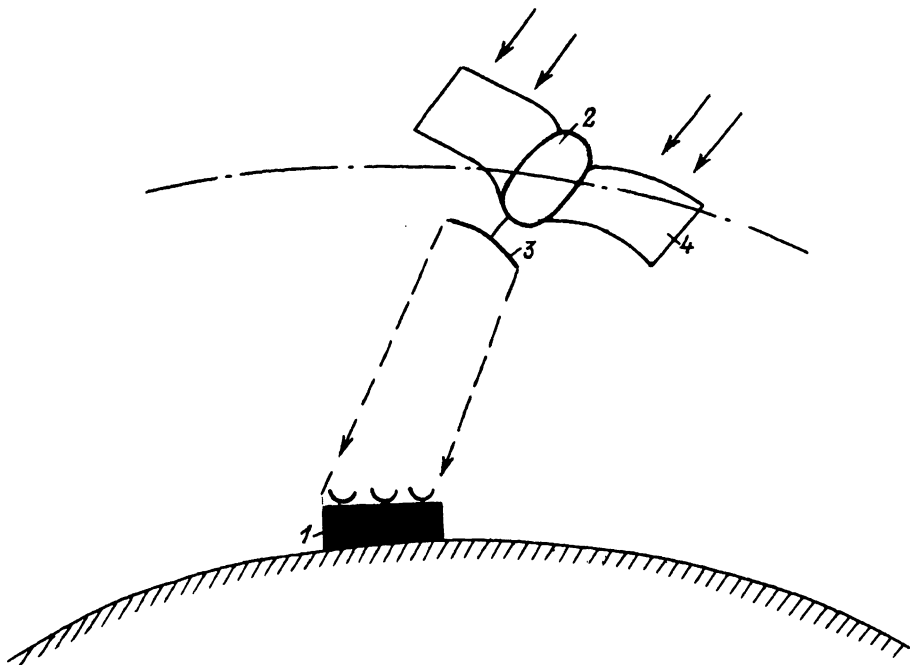


Рис. 3. Схема передачи энергии с солнечной космической станции (СКЭС). 1 - приемный комплекс, 2 - СКЭС, 3 - передающее радиозеркало, 4 - панели с солнечными батареями.

задач космической энергетики: передачу энергии с Земли, со спутника или с СКЭС на спутник и обратно. Варианты использования спутников, летящих на высотах 100-1000 км, могут оказаться гораздо практичнее, чем варианты с созданием станций на геостационарных орбитах на 36000 км, т.к. большие расстояния требуют больших приемных площадей.

С п и с о к л и т е р а т у р ы

- [1] СВЧ-энергетика / Под ред. Э. Окресса. М.: Мир, 1971. Т. 1. 463 с.
- [2] Грилихес В.А. Солнечные космические станции. Л.: Наука, 1986. 180 с.
- [3] Аскарьян Г.А., Батанов Г.М., Бережечка Н.К., Грицинин С.И., Коссий И.А., Раевский И.М. // Письма в ЖЭТФ. 1979. Т. 29. В. 11. С. 706-709.
- [4] Генерация волн и квазистационарных токов в плазме. Труды ИОФАН. 1988. Т. 16.
- [5] Батанов Г.М., Коссий И.А., Рабинович М.С. // Письма в ЖТФ. 1979. Т. 5. В. 7. С. 432-435.

[6] Батанов Г.М., Грицинин С.И., Коссы И.А., Магунов А.Н., Силаков В.П., Тарасова Н.М. СВЧ разряды высокого давления. Труды ФИАН. 1985. Т. 160. С. 174-203.

Институт общей физики
АН СССР, Москва

Поступило в Редакцию
16 января 1989 г.

Письма в ЖТФ, том 15, вып. 8

26 апреля 1989 г.

04; 10

РАЗВИТИЕ ПУЧКОВО-ПЛАЗМЕННОГО РАЗРЯДА ПРИ ТРАНСПОРТИРОВКЕ ВЫСОКОЭНЕРГЕТИЧНОГО МОДУЛИРОВАННОГО ПРОТОННОГО ПУЧКА В ГАЗЕ

В.А. Киселев, А.Ф. Линник,
Я.Б. Файнберг, В.Н. Белан,
А.К. Березин, Ю.П. Блюх,
А.М. Егоров, Б.И. Иванов,
И.Н. Онищенко, В.В. Усков

Исследования по пучково-плазменному разряду (ППР) ранее проводились при инъекции в нейтральный газ электронных пучков [1-3]. При инъекции в нейтральный газ ионных пучков с небольшими токами и с энергией 20-100 кэВ [4, 5] аналогичных явлений обнаружено не было, т.к. из-за захвата электронов плазмы и перезарядки ионов пучка стабилизация пучковой неустойчивости происходила при амплитудах возбуждаемых полей ниже пробойных. Однако ППР наблюдался при инъекции сильноточного ионного пучка с энергией 100 кэВ в газовую мишень, находящуюся в продольном магнитном поле [6, 8].

В настоящей работе исследовалось экспериментально и даны теоретические оценки развития ППР при транспортировке высокоэнергетического модулированного по плотности протонного пучка в газе без внешнего магнитного поля. Источником протонного пучка служил резонансный линейный ускоритель с ВЧ-фокусировкой [7]: энергия протонов - 5 МэВ; ток в импульсе ≈ 30 мА, длительность импульса - 2 нс, эмиттанс пучка - 10^{-3} рад. см; каждый импульс состоял из $3 \cdot 10^3$ протонных сгустков с частотой следования - $\omega_M \sim 9.2 \cdot 10^8$ с $^{-1}$. Плотность протонов на оси пучка - $n_b \sim 10^7$ см $^{-3}$. Камера взаимодействия представляла собой стеклянную трубу диаметром 10 см и длиной 100 см, имеющую автономную откачку и отделенную от ускорителя ловсановой пленкой толщиной 12 мкм. Рабочий газ - водород или воздух.

Для диагностики пучка и плазмы были использованы: цилиндр Фарадея, расположенный в конце камеры взаимодействия, специаль-