

Министерство образования и науки Российской Федерации

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«САРАТОВСКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ ИМЕНИ Н.Г. ЧЕРНЫШЕВСКОГО»

Кафедра физики открытых систем

Применение высокомошных СВЧ-приборов

АВТОРЕФЕРАТ БАКАЛАВРСКОЙ РАБОТЫ

Студентки 4 курса 431 группы
направления 03.03.03 Радиопизика
Факультета нелинейных процессов
Авериной Ольги Игоревны

Научный руководитель
к. ф. - м.н., доцент

С.А. Куркин

Заведующий кафедрой
проф., д. ф.-м.н.

А.А. Короновский

Саратов 2017 г.

Введение

Актуальность работы. Существует сильная связь между развивающейся технологией и ее приложениями. Новые технологии помогают создавать приложения, ранее неосуществимые или непрактичные. И наоборот, требования, предъявляемые приложениям, могут стимулировать развитие нового технологического потенциала. Высокая мощность и энергоэффективность, которые стали возможными благодаря исследованиям волн сверхвысокочастотного диапазона, вызвали интерес к технологии передачи мощного микроволнового излучения и оружию направленной энергии. С другой стороны, требования к электронному циклотронному резонансному нагреву плазмы привели к разработке прикладной программы для построения высокочастотных СВЧ-источников с высокой средней мощностью. В моей работе рассматривается текущее состояние таких приложений.

За последние 20 лет в некоторых областях использование мощных СВЧ источников увеличилось, в некоторых уменьшилось, а в некоторых прекратилось. Наиболее успешным является оружие направленной СВЧ-энергии, которое теперь интенсивно развивается. Финансирование в течение последних нескольких десятилетий было самым высоким для оборонно-ориентированной работы. Исследования в области передачи энергии довольно успешны, также как и в области микроволнового нагрева плазмы. По продолжительности изучение и исследование явления нагрева плазмы являются, пожалуй, самыми долгими. В настоящее время резко возрос интерес к широкополосным и сверхширокополосным сигналам типа импульсов очень короткой длительности. С использованием сверхширокополосных (СШП) сигналов удалось реализовать информационные технологии, которые вообще не имеют конструктивных аналогов в рамках традиционных подходов. После отказа от клистронов высокой мощности для Международного линейного коллайдера ускорение частиц отошло в сторону, и лазерная накачка с использованием микроволн исчезла.

Цель данной выпускной квалификационной работы состоит в проведении обзора и систематизации данных рассмотренных статей и научной литературы о следующих областях применения высокомошных СВЧ-приборов: высокомошном СВЧ-оружии, радарах высокой мощности, передаче мощности на расстоянии, космических двигателях, нагреве плазмы, ускорителях частиц.

Актуальность данной работы обусловлена тем, что в настоящее время имеется много литературы (как отечественной, так и зарубежной), посвящённой мощным СВЧ источникам, однако, современного обзора на русском языке по сформулированной теме обнаружено не было.

В первом разделе «Высокомошное СВЧ-оружие» рассказывается об: общих аспектах высокомошного СВЧ-оружия, электронных бомбах, первичных СВЧ-приборах высокой мощности, системе активного сдерживания, нейтрализации самодельных взрывных устройств, наземной сверхвысокомошной микроволновой системе Vigilant Eagle, различных миссиях, электромагнитном терроризме, связи, защите и воздействии СВЧ-излучения на электронику.

Во втором разделе «Радар высокой мощности» рассказывается о том, как используются мощные микроволны для радиолокационных станций, необходимых для мощности передатчика.

В третьем разделе «Передача мощности на расстоянии» идет речь об использовании микроволнового потока мощности для эффективной передачи энергии от солнечных элементов в космическом пространстве к земной поверхности.

В четвертом разделе «Космические двигатели» рассказывается о применении СВЧ излучения в системах космических аппаратов, обеспечивающих их ускорение для: запуска на орбиту, запуска с орбиты в межпланетное и межзвездное пространство, размещения крупных космических устройств.

В пятом разделе «Нагрев плазмы» рассказывается о трех способах нагрева плазмы, а именно нагреве методом ионно-циклотронного резонанса

(НМИЦГ), низкогибридном нагреве (НГН) и нагреве методом электронно-циклотронного резонанса. Также об источниках, используемых при нагреве методом электронно-циклотронного резонанса.

В шестом разделе «Ускорители частиц» говорится о: классификации ускорителей, принципе их работы, сферах применения и значимости.

1. Высокочастотное СВЧ-оружие

В этом разделе пойдет речь об основном приложении для мощных микроволн: электромагнитном несмертельном оружии.

Оружие, которое направляет энергию на цели, претерпело обширные исследования за последние два десятилетия. У него есть два потенциальных преимущества перед существующими системами оружия. Во-первых, оно использует источник питания, а не различное множество взрывных боеприпасов; Это «множество» вряд ли будет использовано в бою. Во-вторых, оно производит атаку со скоростью света, в 160 000 раз быстрее, чем пуля, что делает невозможным исключение входящего затвора и отрицает преимущество перед все более быстрыми тактическими ракетами [1].

Оружие направленной энергии (ОНЭ) обычно подразделяется на три категории: лазерное, микроволновое или радиочастотное энергетическое оружие и заряженное пучковое оружие. СВЧ имеет преимущество перед другими ОНЭ, поскольку микроволны не сталкиваются с серьезной проблемой распространения. Пучки частиц и лазеры испытывают трудности при распространении в атмосфере, а электронные пучки не могут распространяться в пространстве. Кроме того, оба являются точечным оружием с небольшими размерами пятна, требующими точного наведения на цель [2]. Антенно-направленные микроволны, с другой стороны, распространяются через дифракцию и имеют размеры пятна, достаточно большие, чтобы учесть некоторую неточность в наведении и отслеживании. Лазеры и пучки частиц также намного менее электрически эффективны, более сложны и, следовательно, более дороги.

Из этого раздела можно сделать вывод, что оружие СВЧ сталкивается со сложным набором факторов, которые влияют на их истинную военную полезность. Сложность СВЧ-оружия направленной энергии в том, что оно требует систематического подхода с тщательным рассмотрением полезности как оружия, то есть анализа взаимодействия, анализа и тестирования связи,

тестирования электронных компонентов, тестирования системы и исследования контрмеры (упрочнения).

2. Радар высокой мощности

Радарные микроволновые устройства высокой мощности зависят не от более высокой мощности напрямую, а от очень коротких импульсов с высокой частотой повторения при высокой мощности. Здесь охватываются короткие импульсы (<10 нс) при высокой мощности: ультракороткие импульсные радары, называемые ультраширокополосным (UWB) радаром [3].

Наиболее очевидное применение высокомошных микроволн для радиолокационных станций состоит в простом увеличении мощности передатчика P_T , тем самым увеличивая максимальный диапазон обнаружения цели.

Некоторые радиолокационные передатчики передают ритмические импульсы электромагнитных волн с заданным количеством времени между каждым импульсом. Мертвое время является основной проблемой, которая ограничивает производительность радара. Использование более коротких импульсов сводит к минимуму это, но радар также должен иметь хороший обратный сигнал в желаемом диапазоне.

Наиболее разработанный микроволновый радиолокатор сверхвысокой мощности - система [4] NAGIRA (наносекундный гигагерцовый радар), построенная в России. Система, показанная на рисунке 1, основана на SINUS-6, в котором трансформатор Тесла заряжается коаксиальной маслonaполненной импульсной линией (PFL) до 660 кВ.

Разрешение радара по дальности определяется соотношением $\delta = c\tau/2$, где τ - длительность импульса, так что радарный сигнал длительностью 10 нс будет давать разрешение диапазоном около 1,5 м.



Рис. 1. Кабина передатчика для системы NAGIRA. Задняя часть импульсного силового генератора SINUS. В нижней правой части показан мотор-генератор, питающий основную мощность. Нижняя антенна на крыше - передающая антенна, а верхняя - приемная.

Использование коротких импульсов большой мощности делает возможным точное разрешение диапазона для обнаружения и отслеживания движущихся целей с низким поперечным сечением при наличии сильных локальных отражений.

3. Передача мощности на расстоянии

Разнообразные схемы были предложены для передачи энергии от Земли в космос, с космоса на Землю, в пространстве и между точками на Земле с помощью СВЧ-излучения. Главное то, чтобы пучок был с большой энергией; пиковая и средняя мощности устанавливаются на время применения [5].

Все такие приложения зависят от передачи в дальней зоне, где расстояние между передающей антенной и принимающей областью больше или равно дальнему расстоянию $2D^2/\lambda$, где D - диаметр наибольшей площади, а λ - длина волны.

Схема показана на рисунке 2. Передающая антенна области A_t помещает свой луч в зону приема A_r , которая может быть другой антенной. В диапазоне R луч, определяемый его шириной луча половинной мощности, обычно будет больше, чем A_r .

В точной общей обработке [6] эффективность передачи мощности для круговых апертур определяется параметром мощности связи

$$Z = \frac{D_t D_r}{\lambda R}, \quad (1)$$

где D_t и D_r - диаметры передающей и приемной антенн соответственно, а R - расстояние между передатчиком и приемником. Для эффективной передачи размер пятна должен быть $\sim D_r$ и $Z \geq 1$.

Чтобы понять зависимость мощностей, необходимо обратить внимание на то, что принимаемая на цели плотность мощности интегрирована над целевой областью.

Эффективность, с которой получена мощность, будет примерно

$$\frac{P_r}{P_t} = \left(\frac{\pi}{4}\right)^2 \varepsilon \left[\frac{D_t D_r}{\lambda R}\right]^2 = \left(\frac{\pi}{4}\right)^2 \varepsilon Z^2 \quad (2)$$

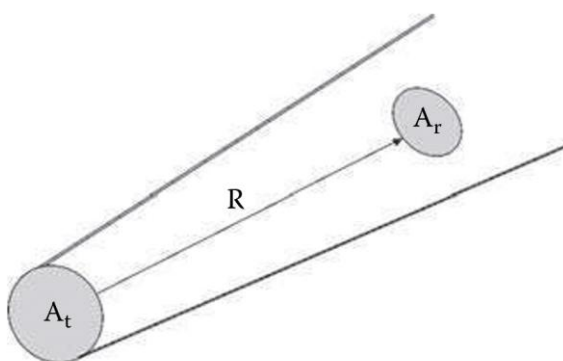


Рис. 2. Схема мощности испускающих лучей; передающий и принимающий участки разделены расстоянием R .

Эффективность передачи изменяется пропорционально Z^2 . Это приблизительно, потому что этот простой анализ не усредняет по целевой области, а учитывает диаграмму направленности антенны и является недопустимым выше $Z \sim 1$.

Точная обработка дает кривую на рис. 3. Передача мощности может быть эффективной при правильном выборе диаметров и длины волны для определенного диапазона. Выбор $Z = 2$ дает высокую эффективность, но $Z = 1,5$

вполне может оказаться более практичным для уменьшения площади диафрагмы [7].

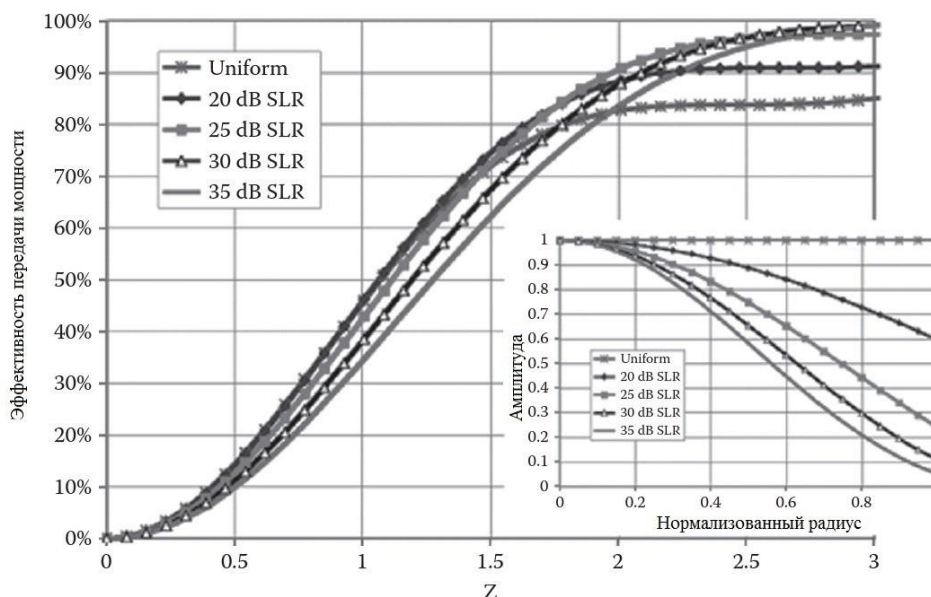


Рис. 3. Передача мощности между отдаленными отверстиями в зависимости от основных параметров, $Z = D_t D_r / \lambda R$. Управление отношением боковых лепестков (SLR) путем сужения мощности через антенну уменьшает боковое излучение, но увеличивает ширину луча.

Основная проблема для всех схем передачи мощности космос - Земля не техническая, а экономическая. Затраты сильно оспариваются [8] и определяют практичность широкомасштабных непрерывных сверхвысокочастотных микроволновых систем в космосе.

4. Космические двигатели

На сегодняшний день полезный груз выводится на орбиту точно так же, как и 50 лет назад - химическими ракетами. Многоступенчатые ракеты обычно достигают долей полезной нагрузки менее 5%.

Уравнение ракеты, которое управляет продвижением исследования космоса, несложно вывести [9]. Если ракета с массой M вызывает изменение импульса, выбрасывая небольшое количество реакционной массы dM с большой скоростью V_e , изменение скорости ракеты следует из закона сохранения импульса,

$$MdV - V_e dM \quad (3)$$

Путем интегрирования, когда топливо расходуется так, что начальная масса M_0 уменьшается до конечной массы M_f , результирующее изменение скорости ракеты,

$$\Delta V = V_e \ln M_0 M_f \quad (4)$$

Поскольку натуральный логарифм очень медленно увеличивается с отношением масс, большие отношения масс не приводят к большому ΔV . Еще один способ увидеть это:

$$\frac{M_0}{M_f} = e^{\frac{\Delta V}{V_e}} \quad (5)$$

что означает, что получение высоких скоростей, необходимых для орбиты или межпланетных зондов одной ракетой, практически невозможно, поскольку структурная масса ракеты слишком высока по сравнению с топливной массой. Структурная экономика, созданная для сохранения этих минутных фракций полезной нагрузки, приводит к созданию хрупких, дорогостоящих ракет. Несмотря на 50-летнюю эволюционную разработку ракеты, лучшие материалы, новые ракетные топлива и умеренно улучшенная надежность, базовая экономика запуска не изменились при стоимости полезной нагрузки около 5000 долл./Кг [10].

Микроволновые тепловые двигатели работают по аналогичному принципу с ядерными тепловыми двигателями, которые экспериментально продемонстрировали удельные импульсы, превышающие 850 с. Это многократный одноступенчатый летательный аппарат, который использует поток мощных микроволн для питания силовой установки теплообменника, называемой микроволновым тепловым двигателем. Используя высокомошные микроволны, источник энергии и вся сложность, которую он влечет за собой, перемещаются на землю, и между ними используется беспроводная система передачи энергии.

5. Нагрев плазмы

За последние 10 лет, сфера использования СВЧ пучков высокой производительности для разогревания плазмы до температур ядерного синтеза

значительно расширилась. В моей работе более подробно рассматривается нагрев методом электронно-циклонного резонанса (НМЭЦР), так как на настоящем этапе данный метод получил широкое распространение.

Существует три основных варианта нагрева СВЧ пучков, отличающихся по частоте микроволн, которые излучаются в плазму и должны резонанстно поглощаться электронами или ионами [11]. Три вида нагрева, которым уделяется значительное внимание исследователей и взаимодействующие резонансные частоты представлены следующими видами:

- Нагрев методом ионно-циклотронного резонанса (НМИЦР)

$$f = f_{ci} = \frac{eB}{2\pi m_i} \quad (6)$$

- Низкогибридный нагрев (НГН)

$$f = f_{LH} \cong \frac{f_{pi}}{\left(1 - \frac{f_{pe}^2}{f_{ce}^2}\right)^{\frac{1}{2}}} \quad (7)$$

- Нагрев методом электронно-циклотронного резонанса (НМЭЦР)

$$f = f_{ce} = \frac{eB}{2\pi m_e}, \text{ или } f = 2f_{ce} \quad (8)$$

Где e – величина заряда электрона или ионизированного изотопа водорода, m_i и m_e – масса иона и электрона, B – величина заряда магнитного поля, $f_{pe} = (n_e e^2 / \epsilon_0 m_e)^{1/2} / 2$, где n_e – объемный вес электронов и ϵ_0 – проницаемость вакуума и $f_{pi} = (n_i Z_i^2 e^2 / \epsilon_0 m_i)^{1/2} / 2$, где $Z_i = 1$ зарядовое состояние ионов в термоядерной плазме. В показателях плотности и поля для термоядерного синтеза $f_{ci} \approx 100$ МГц, $f_{LH} \approx 5$ ГГц, и $f_{ce} \approx$ от 140 до 250 ГГц. Негативный фактор применения первого и второго способов нагрева частот заключается в сложности разработки антенны, которая соединяет микроволны в защитной оболочке реактора плазмы с порядковой размерностью длины волны.

НМЭЦР имеет определенные преимущества в виде достаточно высокой средней выходной мощности нагрева плазмы в определенных областях вследствие зависимости данного механизма от магнитного поля. Следующим положительным моментом является возможность расположения антенны

запуска вне пределов плазмы для того, чтобы не исказить и не препятствовать проведению эксперимента термоядерной реакции. Электронная циклотронная волна имеет хорошую проходимость в вакууме и эффективно соединяется с границей плазмы, в отличие от других техник.

6. Ускорители частиц

Многочисленные исследования источников высоких энергий были мотивированы необходимостью в ускорителях с более высокой энергией.

Прежде чем обсуждать роль таких источников в достижении целей более высокой энергии и очень высоких ускоряющих градиентов, вкратце рассмотрим основные принципы линейных ускорителей. На рис. 4 представлена блок-схема линейного ускорителя радиочастот. Внутри ускоряющих секций сгустки электронов ускоряются осевой составляющей электрического поля высокомоощных микроволн. Микроволны производятся импульсами конечной длительности.

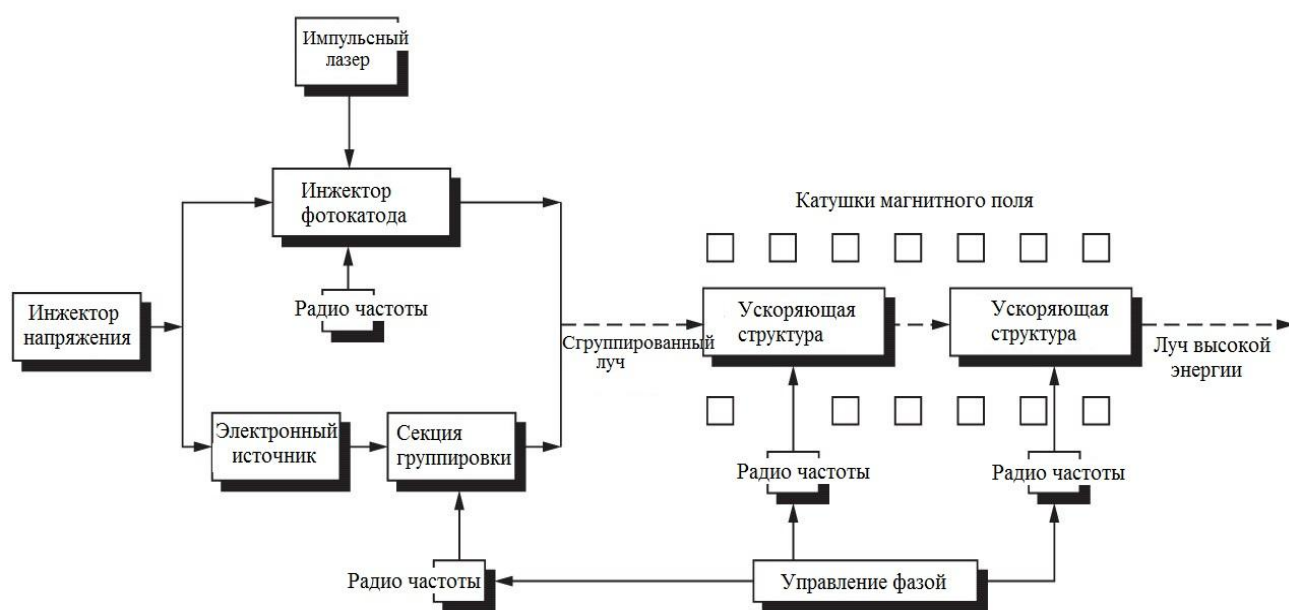


Рис. 4. Схема линейного ускорителя с электронно-лучевым управлением. Инжектор фото катода или обычный источник электронов создает сгруппированный пучок, который вводится в ускоряющие полости.

Сгусток пучка для ускорителя производится в инжекторе. Из двух основных типов инжекторов более распространен нижний, показанный на

рисунке, в котором электроны из источника сначала ускоряются в секцию группировки. Секция группировки во многом подобна ускоряющей секции.

Разрабатываемый инжектор второго типа, известный как фотоинжектор, работает при импульсном лазерном освещении катода, выполненного из фотоэмиттера.

Ускоряющие секции адаптируют свойства микроволновых полей, чтобы они могли эффективно взаимодействовать с электронными сгустками. Пример ускоряющего участка показан на рисунке 5 [12]. В ускорителе бегущей волны радиочастота подается в секцию на одном конце и проходит по участку своей фазой синхронно с пучками, так что они ощущают постоянную ускоряющую силу; На выходном конце секции поглощается радиочастота. В ускорителе стоячей волны поля радиочастоты расположены в виде стоячей волны с нулевой фазовой скоростью вдоль оси сечения; частота и фаза полей будут такими, что связка всегда будет ощущать ускоряющую полярность полей, когда она переходит в полость ускоряющего участка.

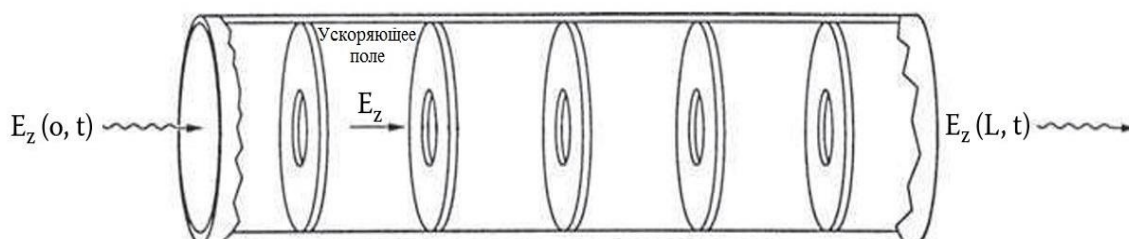


Рис. 5. Участок ускорения линейного ускорителя с микроволновым излучением с использованием дискового нагруженного волновода длиной L .

В течение десятилетий разрабатывались три технологии ускорения: медные радиочастотные резонаторы, сверхпроводящие радиочастотные резонаторы и двухлучевое ускорение.

В настоящее время изучается ряд других спекулятивных возможностей для достижения уровней ТэВ энергии с ускоряющими градиентами порядка 100 МэВ/м. Некоторые из них довольно абстрактны и выходят за рамки нашего обсуждения: ускорители поля следа, переключаемые ускорители мощности и ускорители лазерного биения используются в плазменной среде [13].

Заключение

В данной выпускной квалификационной работе бакалавра мною был проведён обзор и систематизированы данные рассмотренных статей и научной литературы о следующих областях применения высокомоощных СВЧ-приборов: высокомоощном СВЧ-оружии, радарах высокой моощности, моощном излучении, космических двигателях, нагреве плазмы, ускорителях частиц.

В разделе о высокомоощном оружии были рассмотрены различные типы режимов атаки. Исследован принцип действия и назначение оружия направленной энергии, строение и применение электронных бомб, а также какое воздействие оказывает моощное микроволновое излучение на электронику.

В разделе, посвященном радиолокации, рассказывается о применении высокомоощных микроволн для радиолокационных станций, необходимых для увеличения моощности передатчика. Также поясняется, как использование высокомоощных микроволн в радаре помогает устранить некоторые из основных ограничений обычного радара.

Далее в разделе о передаче моощности на расстояние рассказывается об использовании микроволнового потока моощности для эффективной передачи энергии от солнечных элементов в космическом пространстве к земной поверхности. В частности, выявлена основная проблема для всех схем передачи моощности, а именно сложность в создании энергетического микроволнового луча, так как для использования его в космических программах из-за дифракции, ограничивающей направленность антенны, необходима диафрагма большого размера. Но несмотря на такую проблему, из сделанного обзора видно, что моощное СВЧ-излучение очень важно в практических приложениях, в научных исследованиях и т.д.

В разделе о космических двигателях идет речь о применении СВЧ излучения в системах космических аппаратов, обеспечивающих их ускорение. Кроме того, идет речь о типах двигательных установок, различающихся в

зависимости от физических принципов, лежащих в их основе, а также о назначении и эффективности.

В разделе о нагреве плазмы мною были рассмотрены три способа нагрева плазмы, которым уделяется значительное внимание исследователей, и обозначены их плюсы и минусы. Также рассказывается о существовании возможных режимов генерации электромагнитных волн в плазме, зависящих от поляризации вектора электрического поля относительно магнитного поля.

При составлении раздела об ускорителях частиц, были выявлены проблемы. Одной из главных, по моему мнению, является масштабность этих установок и финансовые затраты на их постройку. Но несмотря на это ускорители заряженных частиц имеют особую важность, так как применяются в различных научных исследованиях, медицине (лечение онкологических заболеваний, радиодиагностика), производстве полупроводниковых устройств и т.д.

Список литературы

1. Benford J., Swegle J. A., Schamiloglu E., High Power Microwaves, Third Edition, 2015.
2. Price, D. et al., Compact pulsed power for directed energy weapons, J. Directed Energy, 1, 48, 2003.
3. Manheimer, W., Applications of high-power microwave sources to enhanced radar systems, in Applications of High Power Microwaves, Gaponov-Grekov, A.V. and Granatstein, V., Eds., Artech House, Boston, MA, Ch. 5, 1994, p. 169.
4. Blyakhman, A. et al., Nanosecond gigawatt radar: Indication of small targets moving among heavy clutters, in Proceedings of the IEEE Radar Conference, 2007.
5. Nalos, E., New developments in electromagnetic energy beaming, Proc. IEEE, 55, 276, 1978.
6. Benford, J., Modification and measurement of the atmosphere by high power microwaves, in Applications of High Power Microwaves, Gaponov-Grekov, A.V. and Granatstein, V., Eds., Artech House, Boston, MA, Ch. 12, 1994, p. 209.
7. Koert, P. and Cha, J., Millimeter wave technology for space power beaming, Microwave Theory Tech. 40, 1251, 1992.
8. Hansen, R.C., McSpadden, J., and Benford, J., A universal power transfer curve, IEEE Microwave Wireless Compon. Lett., 15, 369, 2005.
9. Criswell, D.R., Energy prosperity within the 21st century and beyond: Options and the unique roles of the sun and the moon, in Innovative Solutions to CO₂ Stabilization, Watts, R., Ed., Cambridge University Press, Cambridge, 2002, p. 345.
10. Matloff, G., Deep-Space Probes, 2nd Edition, Springer-Verlag, New York, 2005.
11. Prather, R., Heating and current drive by electron cyclotron waves, Phys. Plasmas, 11, 2349, 2004.
12. Benford, J. and Benford, G., Elastic, electrostatic and spin deployment of ultralight sails, JBIS, 59, 76, 2006.
13. Benford, J., Benford, G., and Benford, D., Messaging with cost optimized interstellar beacons, Astrobiology, 10, 475, 2010.