

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

Элементы и проблемы высокоомощной СВЧ и ТГц техники

АВТОРЕФЕРАТ БАКАЛАВРСКОЙ РАБОТЫ

студента 4 курса 431 группы
направления 03.03.03 Радиофизика
Факультета нелинейных процессов
Жерихова Алексея Петровича

Научный руководитель

доцент, к.ф.-м.н.

С.А. Куркин

Зав. кафедрой физики

открытых систем

проф., д.ф.-м.н.

А.А. Короновский

Саратов 2017 г.

Введение

В настоящей работе был проведен обзор вопросов, связанных с элементами высокомоощных СВЧ (ВСВЧ) источников и проблемами продвижения в терагерцевый (ТГц) диапазон. На данный момент существует много различных источников, посвященных данным вопросам, поэтому анализ и систематизация данных является важной задачей, т.к. проблемы открыты и есть перспективы в развитии данного направления в связи с широкой областью применения ВСВЧ.

Быстрое развитие высокомоощных СВЧ (ВСВЧ) в 1980-х годах было обусловлено наличием технологической базы, которая была разработана для других применений. Импульсные электрические системы, называемые импульсной мощностью, были разработаны в 1960-х годах для моделирования эффектов ядерного оружия. Позже, инерциальный управляемый термоядерный синтез стал ведущим для технологии импульсного питания. Для проведения первоначальных экспериментов в значительной степени использовались существующие источники импульсной мощности. Были детально изучены интенсивные пучки, генерируемые источниками импульсной мощности, включая генерацию пучка и распространение пучка в различных средах, таких как вакуум, плазма и газы. При диагностике ВСВЧ основная часть используемых методов - это обычные методы диагностики с дополнительным ослаблением для снижения уровней мощности до того, как будут сделаны диагностические данные. Аналогичным образом, антенны использовали прямую экстраполяцию обычной конструкции антенны с некоторой осторожностью, чтобы избежать пробоя воздуха[1].

С появлением средств конкретно предназначенных для изучения эффектов высокомоощных СВЧ и развитием технологий, основными вопросами являются эксплуатационные ограничения и ограничения

безопасности для защиты персонала и вспомогательного электронного оборудования от воздействия мощных импульсов[1].

Одной из тенденций развития современной радиоэлектроники является освоение терагерцевого частотного диапазона, занимающего промежуточное положение между хорошо изученными микроволновым и оптическим участками спектра электромагнитного излучения. В последние годы резко возросло количество фундаментальных и прикладных исследований по этой тематике[2].

Продвижение в область терагерцевых частот осуществлялось с двух направлений: со стороны диапазона миллиметровых волн и со стороны инфракрасного (ИК) спектра излучения. В ходе освоения в методологию исследований ТГц-диапазона привносились методические подходы и технические решения, свойственные как микроволновой технике, так и оптике. В результате и нижняя, и верхняя границы диапазона оказались «размытыми», а методы исследований и практического освоения различными для низкочастотной и высокочастотной областей диапазона[3].

Во второй части работы рассмотрим недавние исследования проблем, возникающих в результате масштабирования существующих архитектур электронных вакуумных устройств до более высоких мощностей. Особые проблемы, включающие в себя радиочастотный срыв, изготовление надежных, но точно рассчитанных высокочастотных электромагнитных структур, магнитную фокусировку и генерацию электронных пучков с большой плотностью тока, а также физику воздействия пучка электронов высокой мощности на схемы и коллекторы. Рассмотрим проблемы и возможности, которые дают распределенные электронные лучи. Обобщим как проблемы, так и возможности исследований для расширения возможностей за пределы текущих достижений в области производительности, и сделаем общие выводы.

ЧАСТЬ I. Технологическое обеспечение высокомошных СВЧ приборов

1 Импульсная мощность

В первые дни, эту технологию часто называли «мощностью в импульсе» вместо импульсной мощности. Термин описывает генерацию коротких электрических импульсов, которые связаны с очень высокой электрической мощностью и, следовательно, с высоким напряжением и амплитудой тока[4]. Например, импульс с амплитудой 100 кВ и длительностью 100 нс подает на нагрузку 10 Ом мощностью 1 ГВт[5]. С каждым укорочения импульса, мощность возрастает. Окончательный результат очень короткий импульс с огромной силой, энергия которого может быть выпущена несколькими способами. Первоначальная цель этой технологии заключалась в использовании импульса для имитации всплесков излучения от взрыва ядерного оружия[6].

Энергия обычно хранится в электростатических полях (конденсаторы), магнитных полях (катушки индуктивности), как механическая энергия, или в виде химической энергии. Выпуская накопленную энергию в течение очень короткого промежутка времени (процесс, который называется сжатием энергии), огромное количество пиковой мощности может быть доставлено к нагрузке. Например, если один джоуль энергии запасается в конденсаторе, а затем равномерно выпущен на нагрузку в течение одной секунды, средняя мощность, подаваемая на нагрузку будет только 1 Вт. Тем не менее, если вся запасенная энергия была выпущена в пределах одной микросекунды, средняя мощность будет один мегаватт, в миллион раз больше[7]. Импульсная технология питания обычно используется в радарх, ускорителях заряженных частиц, сверхсильных

магнитных полях, электромагнитных импульсах и высоко мощных импульсных лазерах[5].

2 Электронные пучки и слои

Так же, как и пучки частиц СВЧ-излучение имеет очень широкий диапазон применений: в быту (СВЧ-печь, сотовые телефоны), медицине (стерилизация, прогрев), обработке материалов, научных исследованиях (нагрев плазмы в магнитных ловушках на электронно-циклотронном резонансе – ЭЦР), а также в специальных приложениях (например: радары, шумовые генераторы). Как правило, в подавляющем большинстве источников СВЧ-излучения используются электронные пучки[8].

Источники высокомоощные СВЧ используют кинетическую энергию электронов в пучке или слое для получения интенсивных СВЧ полей. Получение интенсивного электронного пучка или слоя начинается с источника электронов[1]. Наиболее распространенные источники электронов, используемые в СВЧ устройствах, основаны на следующих явлениях:

- 1) Взрывная термоэлектронная эмиссия
- 2) Автоэлектронная эмиссия
- 3) Термоэлектронная эмиссия
- 4) Фотоэлектронная эмиссия

Ни один тип источника не является идеальным для любого применения; выбор технологии зависит от ВСВЧ устройства, в котором он будет использоваться и требований этого устройства.

Наиболее часто используемые источники электронов в современных импульсных устройствах ВСВЧ основаны на процессе взрывной эмиссии[1].

3 Компрессия СВЧ импульсов

Различные экспериментальные схемы активного сжатия импульса ВСВЧ изучались в течение последних 25 лет. Все эти усилия вдохновляются поиском путей повышения излучаемой мощности СВЧ, сжимая первоначальный длительный сигнал малой мощности или даже микроволновый сигнал непрерывной волны в кратковременный СВЧ-импульс высокой мощности, сохраняя при этом общую постоянную излучаемую энергию СВЧ-диапазона[9].

Технология сжатия импульса, которая преобразует, длительные импульсы малой мощности в короткие импульсы высокой пиковой мощности обычно используется в приложениях, требующих высокую пиковую мощность и работающих в импульсном режиме, таких как гидроакустические и радиолокационные систем. Процесс можно рассматривать как увеличение постоянного тока импульсной компрессии, т.е. импульсной мощности[1]. Сжатие импульсов может быть использовано для улучшения пространственного и временного разрешения, а также отношения сигнала к шуму радиолокационных систем и яркости изображения в многофотонных системах визуализации. Современные работы были обусловлены, в первую очередь, необходимостью получения более высоких ускоряющих градиентов в линейных коллайдерах. Компрессоры были изучены в качестве основы СВЧ оружия, сжимая ускоряющий уровень импульса клистрона до ~ 50 нс, чтобы достичь > 100 МВт в компактном корпусе.

4 Антенны и распространение волн

В современных условиях техника антенн является одной из наиболее быстро развивающихся областей радиоэлектроники. Современные достижения в технике антенн основываются на последних разработках электроники, техники полупроводников, когерентной радио-оптики,

оптоэлектроники и т.д. Различные объекты, как наземные, так и летательные аппараты, имеют множество антенн различных диапазонов и назначений, и обеспечение их электромагнитной совместимости во многом зависит от характеристик и параметров антенн[10].

Традиционными технологиями антенны, которые подчеркивают ВСВЧ, являются высокая мощность и малая длительности импульса. Следовательно, ВСВЧ антенны являются прямой экстраполяцией традиционной технологии антенны, как правило, в простой форме, с учетом эффектов высокого электрического поля и краткостью импульса[1].

5 Методы диагностики

Исторически сложилось, что диагностики ВСВЧ позаимствовали многие методы от обычной диагностики микроволн. Они используются для характеристики трех пространственных областей: источник, излучаемое поле, а также внутренность тестового объекта. Здесь мы рассматриваем диагностику СВЧ-импульса. Диагностика плазменных процессов внутри источника, еще в первобытном состоянии. Для того, чтобы лучше понять сокращения импульса, ВСВЧ сообщество должно измерять фактические электромагнитные структуры и свойства плазмы источников ВСВЧ. Необходима более подробная диагностика, в частности, СВЧ-распределений поля, расположения и движения плазмы, а также распределение скоростей электронов и ионов. Одним из методов, которые должны применяться к ВСВЧ, является синтез, который разрабатывается физиками плазмы[1]. Частотно-временной анализ СВЧ сигналов и спектров шума может быть широко использован при анализе работы ВСВЧ устройства. Будущие методы будут измерять временную зависимость пропускной способности, лучевой нагрузки (при больших токах) и спектров шума.

6 Сооружения для высокомошных СВЧ

Основными видами деятельности, для которых разрабатываются ВСВЧ объекты, являются исследование источников и тестирование электронных эффектов. Обычный закрытый СВЧ-объект производит исследования как источника, так и тестирования эффектов, с помощью единых измерительных приборов и систем безопасности. Наиболее примечательной особенностью закрытых помещений, является безэховая комната, т.е., комната, в которой микроволновые отражения сведены к минимуму за счет использования амортизаторов на стене[1].

ЧАСТЬ II. Основные элементы вакуумных СВЧ устройств и проблемы продвижения в терагерцевый диапазон

7 Проблемы масштабирования до более высоких мощностей

Существует контраст в погоне за большей мощностью между высокомоощными СВЧ устройствами и компактными устройствами, которые заполняли бы терагерцевый промежуток выше 100 ГГц. Чтобы продвигать высокомоощные СВЧ устройства для электронной атаки, требуется более высокая мощность в относительно скромном диапазоне частот, то есть между 1 и 10 ГГц. Простая оценка показывает, что это становится проблемой при управлении плотностями высокой мощности. Например, в этом частотном диапазоне типовые размеры поперечного сечения типичного устройства, определяемые примерно по длине волны λ_0 излучения, составляют порядка $\sim 10 \times 10$ см или ~ 100 см². Для уровней мощности, превышающих 100 МВт, необходимо управлять плотностями мощности, превышающими 1 МВт/см². Между тем, чтобы заполнить терагерцевый промежуток, можно было рассматривать задачу достижения некоторой желаемой мощности, например, 100 Вт, на частотах выше 100 ГГц. Например, чтобы реализовать практически эффективные эффекты взаимодействия лучей, размеры поперечных сечений компактных, т.е. медленных или транзитных ВЭУ на высоких частотах будут примерно пропорциональны одной десятой длины волны свободного пространства, или $0,1 \times \lambda_0$. Следовательно, для достижения 100 Вт на частоте 300 ГГц необходимо управлять плотностями мощности свыше $(100 \text{ Вт}) / (0,1\lambda_0 \times 0,1\lambda_0) \sim 1 \text{ МВт/см}^2$ [11]. Из этого мы видим, что, хотя основной подход к более высокой мощности различен для этих двух частотных режимов, конечный результат почти такой же. В оставшейся части этого раздела мы обсудим, как эта общая задача управления высокой плотностью мощности приводит к решению как аналогичных, так и дополнительных физических проблем.

7.1 Высокая плотность электромагнитной мощности

Пожалуй, наиболее очевидной проблемой, связанной с высокой плотностью электромагнитной мощности, является вероятность высокочастотного пробоя из-за очень высоких электрических полей. Хотя Швингер и предсказывал спонтанное разрушение вакуума достаточно сильными электрическими полями и условия были подобраны или даже реализованы в экспериментах по лазерной физике и физике высоких энергий, это далеко за пределами ВЭУ в СВЧ диапазоне[12]. Тем не менее, при умеренно высоких электрических полях действительно возможен ряд пробойных явлений, которые наблюдались на границах раздела материалов, включая срыв проводящей и диэлектрической поверхности и воздушный срыв вне вакуума. Тем временем, особенно для высокочастотных устройств большой мощности, возникают фундаментальные вопросы о том, как построить миниатюрную электромагнитную структуру или схему с достаточной точностью, чтобы она могла удержать излучение, обеспечить точную фазовую скорость, создать интенсивное электрическое поле вблизи пучка (для эффективного взаимодействия пучка с волной)[11].

Между тем, для получения высокой плотности электромагнитной мощности требуется еще большая плотность мощности электронного пучка, учитывая эффективность преобразования энергии менее 100%[11]. Это создает проблемы создания и поддержания интенсивных электронных пучков с высокой плотностью тока, а также понимания физики и ограничений взаимодействий луча с поверхностью, связанных с воздействием луча (на коллектор, анод или стенки схемы). Рассмотрим каждую из этих проблем более подробно.

7.1.1 Радиочастотный срыв

Срыв на вакуумной стороне может инициироваться либо мультипакторным эффектом, либо полевой эмиссией. Мультипакторный эффект - это процесс генерации электронов низкого давления[13]. Электроны, эмитируемые с поверхности, ускоряются высокочастотными полями и ударяются либо на одну, либо на вторую поверхность, высвобождая поток вторичных электронов[1]. Ускорение вторичных частиц до того, как они тоже энергично ударят по поверхности и создадут еще больше вторичных частиц, приводит к каскадному накоплению электронов, нагреву поверхности, выпуску газа либо через термическую, либо через вынужденную десорбцию, либо к дуговому или плазменному разряду. Обычно для проводящих материалов требуется две поверхности и синхронизация между радиочастотным полем и орбитами. Диэлектрические окна, могут испытывать одноповерхностный мультипакт. Этот процесс не требует синхронизации, но он требует достаточного заряда для наращивания диэлектрика для повторного использования испускаемых вторичных частиц[14]. В общем, мультипакт имеет тенденцию возникать при меньших напряженностях электрического поля, и избежание вакуумного поверхностного мультипакта возможно благодаря тщательной разработке моделей электромагнитного режима, геометрии поверхности и материалов[11].

7.1.2 Изготовление схем ТГц режима

Компактные и мобильные вакуумные электронные приборы обычно используют либо низкочастотные, либо полостные электромагнитные структуры. Из основных принципов физики взаимодействия волн в пучке, можно сделать вывод о том, что эффективная передача энергии волны в пучке требует, чтобы поперечные размеры цепи были меньше или равны приблизительно $0,1\lambda_0$. Между тем, для обеспечения надежной работы

устройства допустимые размеры должны составлять 10 % погрешности между изготовленными размерами и предполагаемыми значениями. Это соответствует требованиям допуска, приближающимся к 1 нм при $f > 500$ ГГц[11]. Это сильно выходит за рамки возможностей обычных технологий механической обработки и точения. Поэтому новые высокоточные методы становятся первостепенными, чтобы надежно и многократно формировать и собирать электромагнитные волновые схемы для миниатюрных, микроскопических вакуумных электронных устройств или микро-ВЭУ, подходящих для применения в терагерцевом режиме.

7.2 Высокоточные электронные пучки

Как обсуждалось ранее, увеличение мощности компактных микро-ВЭУ в ТГц-режиме подразумевает электронные пучки высокой плотности. Это создает ряд проблем, которые, наряду с трудностями изготовления миниатюрных схем, обусловили отсутствие источников в терагерцевом промежутке.

7.2.1 Магнитная фокусировка плотного заряда электронного луча

Поучительный подход к пониманию проблем физики электронных лучей в микро-ВЭУ большой мощности в ТГц-режиме состоит в том, чтобы начать с типичных параметров для обычного микроволнового ЛБВ генератора с мощностью 100 Вт, с частотой 5 ГГц и масштабировать размеры для создания ЛБВ с мощностью 100 Вт, и частотой 200 ГГц, просто пересекая терагерцевый промежуток для мощных компактных источников . Принимая иллюстративные параметры ЛБВ 2,5 кВ, 0,2 А и 20 А/см² и масштабируя при постоянном напряжении до 200 ГГц, сокращение на 40 на длине волны переводится в плотность тока 32 кА/см². Минимальное магнитное поле, необходимое для фокусировки сил отталкивания пространственного заряда в этом пучке, - это то, которое удовлетворяет равновесию Бриллюэна.

Учитывая, что максимальное магнитное поле, достижимое в компактной конфигурации с постоянными магнитами, составляет приблизительно 1 Т или 10 кГ, нетрудно вывести, что масштабированный 100 Вт, 200 ГГц ЛБВ с постоянным напряжением непрактичен.

7.2.2 Высокоточные катоды

Предыдущее обсуждение указывает на важность генерации и транспортировки электронных пучков большой силы тока и высокой плотности тока для ВЭУ с более высокой мощностью. Фактически, это проблема для высокомошных СВЧ устройств и устройств в миллиметровом-терагерцевом диапазоне. Так как электронный пучок начинается с катода, мы также сначала рассмотрим ограничения на рабочие характеристики и физическое понимание катодов с большой плотностью тока для генерации этих пучков. Создание электронного пучка требует подачи достаточной энергии электронам внутри поверхности твердого тела, чтобы обеспечить возможность их выхода из сил связывания в вакуум. Механизмы, используемые для реализации вакуумной эмиссии, включают в себя термоэлектронную эмиссию, фотоэмиссию и вторичную электронную эмиссию. Большинство катодов для устройств генерации СВЧ используют один из первых двух, хотя многие ЛСЭ полагаются на фотоэмиссию, а устройства с поперечным полем используют вторичную электронную эмиссию.

7.2.3 Физика воздействия плотного луча

Основываясь на вышеприведенном обсуждении, компактные источники большой мощности излучения в миллиметровом-терагерцевом режиме и высокомошные СВЧ источники разделяют потребность в электронных пучках с большой плотности тока. Рассмотрим еще одну проблему, связанную с электронными пучками с высокой плотностью: эффекты воздействия электронного луча на коллектор и стенки

электромагнитного контура, которые находятся в непосредственной близости от сильного взаимодействия пучковой волны.

Воздействие электрона на коллектор и поверхность структуры может приводить к образованию вторичных электронов, нагреванию устройства и формированию плазмы на коллекторе или аноде, что приводит к снижению эффективности или сокращению длительности импульса. Первичные или вторичные электроны, которые отражаются обратно в схему электромагнитного взаимодействия, могут изменять взаимодействие пучковой волны и снижать эффективность и линейность устройства. Это мотивировало пересмотр явления вторичной электронной эмиссии. Одним из ключевых выводов этой недавней работы является то, что выход вторичных электронов зависит от времени, со шкалой времени эволюции от минут до часов при непрерывной бомбардировке пучком электронов.

7.2.4 Другой взгляд на магнитную фокусировку: эмиттанс

В предыдущем обсуждении подчеркивалось только влияние удержания объемного заряда. Однако следует также учитывать влияние электронной поперечной или тепловой энергии, иногда характеризующейся эмиттансом пучка ϵ . Эмиттанс пучка действует как поперечная сила градиента давления из-за случайной тепловой поперечной кинетической энергии в электронах пучка.

8 Альтернатива: распределенные электронные пучки

Даже при использовании катодов с чрезвычайно низким эмиттансом предполагается, что подходы, основанные на масштабировании низкочастотных архитектур до высоких частот путем уменьшения размеров поперечного луча и схемы, могут оказаться непрактичными выше нескольких сотен ГГц. Альтернативный подход, который привлек в последнее время значительный интерес, состоит в том, что по мере увеличения частоты необходимо только уменьшить один боковой размер,

соизмеримый с уменьшающейся длиной волны, что позволяет другому размеру в боковом направлении оставаться большим. В этом подходе используются распределенные электронные пучки, такие как листовые пучки или массивы из нескольких пучков, которые обеспечивают большие электронные токи для генерации высокой мощности в ТГц диапазоне, сохраняя при этом низкую плотность тока электронов.

9 Итоги и сохраняющиеся проблемы

Впечатляющие успехи были достигнуты как в фундаментальных, так и в прикладных исследованиях вопросов, имеющих решающее значение для повышения мощности вакуумных электронных источников в двух категориях устройств: предназначенных для применения в короткоимпульсных высокомоощных СВЧ и для применений в ТГц-диапазоне, требующих источники компактной высокой и средней мощности. Рассматривая диапазон этого исследования, можно определить как общие проблемы, так и контрасты. У обоих, например, проблемы с высокой плотностью электромагнитной мощности, но РЧ срыв, являющийся проблемой для $f \leq 100$ ГГц, не является проблемой в обозримом будущем для компактных источников высокой мощности выше 100 ГГц. Оба получат выгоду от дальнейших исследований физики поверхностного взаимодействия электронов, для понимания воздействия луча, нагрева поверхности и выделения атомов газа, вторичной электронной эмиссии и высокой плотности тока, долгоживущих катодов.

По-прежнему, существует большое количество тем, требующих дальнейшего изучения. Полный комплект возможных электромагнитных цепей еще предстоит исследовать на совместимость с потребностями компактных ВЭУ высокой мощностью. Как обсуждалось выше, по-прежнему требуется большое дополнительное исследование долгоживущих, низкофункциональных, равномерно излучающих, низко-потенциальных катодов и катодов с высокой плотностью тока. Инновации необходимы для

обеспечения управления режимом и компактного сопряжения входных и выходных сигналов в электромагнитном контуре, совместимом с распределенными электронными лучами.

Наконец, остаются фундаментальные вопросы исследования относительно физики омических потерь тока в стенках электромагнитных цепей на частотах выше 100 ГГц. Для частот ниже 100 ГГц, вероятно, наиболее важной характеристикой эффективной волноводной схемы ВЭУ является сильная связь между лучами или высокий импеданс взаимодействия. Однако выше 100 ГГц, омические потери схемы становятся равными по важности или даже более важным, чем импеданс взаимодействия. Поэтому точное знание эффективной высокой частоты или высокочастотной проводимости объемных металлических поверхностей и металлических пленок имеет решающее значение для успешного проектирования и изготовления волноводных компонентов и источников ВЭУ в ТГц-режиме излучения.

Выводы

Существует много потенциальных применений для компактных источников электромагнитного излучения с высокой мощностью в миллиметровом (терагерцевом) диапазоне, включая радиолокацию высокого разрешения, высокоскоростную передачу данных, скрытое оружие или обнаружение угроз, удаленное изображение с высоким разрешением, химическую спектроскопию, исследования в области глубокого космоса и связи, биомедицинскую диагностику. Вакуумные электронные источники имеют неотъемлемые преимущества для компактных источников высокой мощности на высоких частотах от 100 ГГц до 1 ТГц. Тем не менее, до сих пор остаются нерешенными проблемы, связанные с высокой плотностью мощности, которые аналогичны проблемам, с которыми сталкиваются низкочастотные коротко-импульсные высокоомощные СВЧ источники. В частности, для продвижения обоих типов источников потребуются

структуры и стратегии для обработки более высоких плотностей мощности и генерации и удержания высокоточного электронного луча.

Недавние исследовательские прорывы включают в себя новые методы точного изготовления миниатюрных электромагнитных цепей, понимания РЧ пробоя, новых катодов с высокой плотностью тока и лучшего понимания физики излучения катода. Оставшиеся проблемы включают в себя задержку радиочастотного пробоя для высокомоощных СВЧ источников, оптимизацию компактных конфигураций схем для устройств в миллиметровом (терагерцевом) диапазоне, которые точно рассчитаны, и способны обрабатывать высокую среднюю мощность, улучшая срок службы долгоживущих, равномерно излучающих катодов с большой плотностью мощности; а также достижения в области управления воздействием компактных электронных пучков большой мощности. Перспективы решения этих и других задач положительны благодаря появлению мощных трехмерных электромагнитных кодов, программ для расчёта оптики пучка, взаимодействий пучка и кинетики частиц и физики поверхностей.

Список использованной литературы

1. J. Benford and J.A. Swegle. High Power Microwaves Third Edition, Artech House, 2016.
2. В.М. Исаев, И.Н. Кабанов, В.В. Комаров, В.П. Мещанов. Современные радиоэлектронные системы, 2014.
3. А.С. Якунин. Устройства поляризации радиоволн в терагерцовом диапазоне частот, М.: Радиотехника, 2012, 256 с.
4. G.A. Mesyats. Pulsed Power, Kluwer Academic/Plenum Publishers, New York, 2005.
5. J. Kolb. Pulsed power, 2009.
6. P. Appelgren. Gigawatt Pulsed Power Technologies and Applications, School of Electrical Engineering Space and Plasma Physics Royal Institute of Technology Stockholm, Sweden 2011.
7. В.М. Novac, M. Istenic, J. Luo, I.R. Smith, J. Brown, M. Hubbard, P. Appelgren, M. Elfsberg, T. Hurtig, C. Nylander, A. Larsson and S.E. Nyholm. A 10 GW Pulsed Power Supply for HPM Sources, IEEE Transactions on Plasma Science, Vol. 34, No. 5, pp. 1814 - 1821, October 2006.
8. Д. И. Трубецков, А. Е. Храмов. Лекции по СВЧ – электронике для физиков. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2004. Т. 2. С. 19.
9. С. Е. Baum. Compression of Sinusoidal Pulses for High-Power Microwaves, Circuit and Electromagnetic System Design Note 48, March 2004.
10. А.П. Пудовкин, Ю.Н. Панасюк, А.А. Иванков. Основы теории антенн: учебное пособие, Изд-во ГОУ ВПО ТГТУ, 2011.
11. J.H. Booske, Plasma Physics and Related Challenges of Millimeter-Wave-to-Terahertz and High Power Microwave Generation, Physics of Plasma, 2008.
12. A.C. Melissinos, The spontaneous breakdown of the vacuum, 1998.
13. R.A. Kishek, Y.Y. Lau, L.K. Ang, A. Valfells, and R.M. Gilgenbach, Phys. Plasmas 5, 2120 1998.
14. J. Benford, F.J. Agee, D.M. Goebel, F. Hegeler, K.J. Hendricks, R.M. Gilgenbach, C. Grabowski, H. Jory, and J.P. Verboncoeur, in High Power Microwave Sources and Technologies, edited by R. Barker and E. Schamiloglu IEEE, New York, 2001, Chap. 4.