



ЛЕКЦИИ ПО СВЕРХВЫСОКОЧАСТОТНОЙ ЭЛЕКТРОНИКЕ ДЛЯ ФИЗИКОВ

Том 1

Д.И. Трубецков, А.Е. Храмов

© ФИЗМАТЛИТ, 2003

М.: ФИЗМАТЛИТ, 2003. 496 с.
ISBN 5-9221-0372-5 (Т. 1)
ISBN 5-9221-0371-7

Современная сверхвысокочастотная электроника представлена в книге с технической стороны с кратким описанием физики и основ теории различных электронных ламп, а детальным описанием основных физических явлений, возникающих при взаимодействии электронных потоков с электромагнитными полями и лежащих в основе различных типов устройств. В книге уделено большое внимание математическому моделированию на ЭВМ явлений в электронных потоках на сверхвысоких частотах. Изложение ведется так, чтобы показать тесную связь сверхвысокочастотной электроники с современной нелинейной теорией колебаний и волн и теорией излучения. Особенностью книги является то, что в ней определенное место занимает история СВЧ-электроники. В первом томе книги излагаются основные понятия, методы и модели «классической» сверхвысокочастотной электроники. Также в нем рассматриваются релятивистские аналоги классических СВЧ-устройств: клистронов, ламп бегущей и обратной волны, приборов со скрещенными полями.

Лекции предназначены для физиков различных специальностей, интересующихся процессами взаимодействия электронов с электромагнитными полями, для научных работников, аспирантов и инженеров, проводящих исследования в области вакуумной СВЧ-электроники, радиофизики, радиотехники и физики плазмы. Они могут быть полезны студентам старших курсов соответствующих специальностей.

Предисловие

Самый успешный путь обучения - проделать все самому и учиться на собственных ошибках. Лучшее этого пути нет. Еще один хороший путь - наблюдать, как кто-то проделывает это. Третий путь - слушать лекции о том, как и что делать; и последний стоящий путь - прочитать об этом.

Р. Компфнер

У книг по сверхвысокочастотной (СВЧ) электронике, в основном, два стиля. Наиболее распространенный можно назвать техническим. В соответствии с этим стилем большую часть книги занимает описание конструкций и параметров

соответствующих приборов, разумеется, с изложением основ их физики и элементов теории. Типичной книгой, написанной в этом стиле, является известный учебник И.В. Лебедева «Техника и приборы СВЧ» (Том I. Техника СВЧ, М.: Высшая школа, 1970 и Том II. Электровакуумные приборы СВЧ, М.: Высшая школа, 1972). Второй стиль - физический. По-настоящему в этом стиле написана, по нашему мнению, лишь одна книга - книга Л.А. Вайнштейна и В.А. Солнцева «Лекции по сверхвысокочастотной электронике» (М.: Сов. радио, 1973). Эта книга уникальна и останется на все времена, пока существует СВЧ-электроника. Но с момента её издания прошло почти тридцать лет. Книга не устарела, но стала неполной: она не отражает сегодняшнего дня СВЧ-электроники. Кроме этого, с появлением вакуумной и плазменной релятивистской электроники, лазеров на свободных электронах и вакуумной микроэлектроники к исследованиям подключились физики, не имеющие систематического образования в СВЧ-электронике. Сказанное определило появление предлагаемых читателю лекций. Это действительно лекции, которые в разном виде (общий курс, спецкурсы) читались студентам-радиофизикам Саратовского государственного университета, на Саратовских школах-семинарах по электронике СВЧ и радиофизике, на соответствующих предприятиях и в НИИ. Поскольку в последнее время оба автора занимаются нелинейной динамикой, под которой сами понимают современную теорию колебаний и волн, в книге широко используются представления и методы этого нового междисциплинарного направления в науке. В частности, использованы элементы курса лекций «Нелинейная динамика и сверхвысокочастотная электроника», который один из авторов (Д.И. Трубецков) прочитал в июне 2001 года в Сеульском национальном университете (Корея).

Ещё одна особенность лекций - в них определённое место занимает история сверхвысокочастотной электроники. М.В. Волькенштейн в своей книге «Перекрестки науки» (М.: Наука, 1972) писал: «Есть физики - и очень хорошие физики, которые не интересуются историей своей науки. Мне это не импонирует. Мне всегда казалось, что знание истории науки, более того, знание творческих индивидуальностей, её развивающих, очень обогащает мысль. В отличие от искусства наука объективна, она имеет дело с независимыми от человека законами природы. Но наука так же как и искусство, создаётся людьми, она есть и познание и творчество. Интересны не только окончательные результаты исследования, но и путь, который к ним привёл, в особенности, если этот путь был найден великим интеллектом». С этим трудно не согласиться, тем более потому, что основные идеи СВЧ-электроники выдвинули не только физики, но и лётчик Сигурд Вариан, гуманитарий Хэлл и архитектор Компфнер.

Основное внимание в книге уделено детальному описанию физических явлений, возникающих при взаимодействии электронных потоков с электромагнитными полями. Математические выкладки приводятся подробно. В ряде случаев даны алгоритмы численного решения задач на ЭВМ. Последнее авторам кажется особенно важным, потому что через всю книгу проходит попытка показать тесную связь сверхвысокочастотной электроники с современной нелинейной теорией колебаний и волн, которая невозможна без вычислительного эксперимента.

Список литературы к каждой лекции не является полностью исчерпывающим и охватывает, как правило, те работы, которые непосредственно использовались при написании лекции. В Предисловии нет краткого изложения каждой лекции, поскольку дано расширенное оглавление, повторяющееся перед текстом каждой из лекций.

Подчеркнём, что первая часть книги будет полезна как раз для физиков, которые не изучали систематически СВЧ-электронику в университете (книга

получилась очень объёмной и пришлось разбить её на два тома). В первом томе излагаются основные понятия, методы и модели «классической» сверхвысокочастотной электроники. Рассматриваются такие, уже ставшие привычными, приборы как клистроны, магнетроны, лампы бегущей и обратной волны. Во втором томе пойдет речь о таких современных областях исследований в электронике, как взаимодействие криволинейных электронных потоков с электромагнитными волнами; лазеры на свободных электронах; сверхизлучение в электронных потоках; плазменная СВЧ-электроника; сверхмощные релятивистские генераторы высокочастотного излучения; вакуумная микроэлектроника.

Лекции предназначены для физиков различных специальностей, интересующихся процессами взаимодействия электронов с электромагнитными полями (в том числе для тех, кто ранее не изучал СВЧ-электронику), для научных работников, аспирантов и инженеров, проводящих исследования в области вакуумной СВЧ-электроники, радиофизики, радиотехники и физики плазмы. Они могут быть полезны студентам старших курсов соответствующих специальностей.

*Д.И. Трубецков
А.Е. Храмов*

Содержание

Предисловие

Лекция 1. Вводная. Основные особенности сверхвысокочастотной электроники. Пять идей, которые создали СВЧ-электронику. Индивидуальное излучение заряженных частиц (спонтанное излучение классических осцилляторов). Индуцированное излучение ансамбля возбужденных классических осцилляторов. Возбуждение резонансной системы заданным током. Стационарные уравнения возбуждения линии передачи электронным потоком. Нестационарная теория возбуждения волновода током медленно меняющейся амплитуды.

Лекция 2. Элементарная кинематическая теория клистронов. Модуляция электронного потока по скорости. Кинематический анализ процесса группировки электронов в пространстве дрейфа. 100\$ идея братьев Вариан и Хансена. Клистронные усилители и умножители частоты. Некоторые результаты теории резонансных автогенераторов. Элементарная теория отражательного клистрона. Клистронный генератор с запаздыванием: от режимов монохроматических колебаний до режимов динамического хаоса.

Лекция 3. Волны пространственного заряда малой амплитуды. Гидродинамическое описание электронного потока. Волны пространственного заряда и группирование в пространстве дрейфа. Резистивный усилитель. Волны пространственного заряда в электронном потоке со столкновениями и диффузией. Двухлучевая неустойчивость (абсолютная и конвективная неустойчивость; глобальная неустойчивость). Неустойчивость Гельмгольца и об одной гипотезе образования спиц в кольцах Сатурна (многопучковая неустойчивость). Циклотронные волны. Связанные волны.

Лекция 4. Нелинейные явления в электронных потоках в гидродинамическом приближении. Неизлучательная неустойчивость Пирса. Диод Пирса: от регулярных автоколебаний к хаосу. Уравнения Годфри. Конечномерная модель колебаний в электронном потоке в диоде Пирса. Управление режимами колебаний в диоде Пирса. Нелинейные волны пространственного заряда. Моделирование нестационарных нелинейных процессов в клистроне с помощью гидродинамических уравнений.

Лекция 5. Математическое моделирование нелинейных явлений на ЭВМ и оптимизация параметров пролетных клистронов. Каскадное группирование электронного потока. Многорезонаторные клистроны. Нелинейная двумерная модель взаимодействия электронного потока с ВЧ полями в клистроне. Уравнения одномерной релятивистской теории многорезонаторного клистрона. Моделирование и оптимизация многорезонаторных релятивистских клистронов. Двумерные эффекты в многорезонаторных клистронных усилителях. Многолучевые клистроны.

Лекция 6. Индуцированное и спонтанное излучение в резонансных автогенераторах. Индуцированное излучение в автогенераторах типа О. Спонтанное излучение электрона при произвольном движении через резонатор. Связь между индуцированным и спонтанным излучением электрона в резонансных автогенераторах. Сравнение классического и квантового подхода.

Лекция 7. Магнетрон, амплитрон и другие. Кинематическая дрейфовая теория движения электронов в скрещенных статических электрическом и магнитном полях и в поле бегущей волны. Фазирувка в скрещенных полях. Расчет мощности взаимодействия и к.п.д. применительно к плоскому магнетрону. Что вносит цилиндричность в физику магнетрона. Цилиндрический магнетрон: история создания от Хэлла до Бута и Рэндала. Вильям Браун и усилитель со скрещенными полями. Карматрон и дематрон.

Лекция 8. Пространственный заряд в скрещенных полях. Пространственный заряд в скрещенных полях и три загадки магнетрона (свойства магнетрона при магнитном поле больше критического, когда генерации нет; начало генерации в магнетроне; есть ли вообще стационарный режим генерации в магнетроне). Неустойчивость электронного потока в скрещенных полях. Вычислительная физика и магнетрон. Связь с проблемой турбулентности в электронном потоке. Сложная динамика пространственного заряда в усилителе со скрещенными полями.

Лекция 9. История создания лампы бегущей волны и элементарная теория взаимодействия электронного потока с бегущей электромагнитной волной. История изобретения Рудольфом Компфнером лампы бегущей волны. Роль Джона Пирса. Анализ взаимодействия электронного потока с бегущей прямой электромагнитной волной на основе метода последовательных приближений. Квадратичная группировка. Качественное описание процесса группирования электронов в бегущей волне. Принципы подобию для приборов с длительным взаимодействием (нерелятивистские и ультрарелятивистские пучки).

Лекция 10. Нелинейная теория лампы бегущей волны. Нелинейные уравнения ЛБВО. Линеаризация нелинейных уравнений ЛБВ. Дисперсионное уравнение ЛБВ. Закон сохранения энергии в электронном потоке, взаимодействующем с бегущей электромагнитной волной. Механизм фазирувки в бегущей электромагнитной волне. Особенности и результаты решения задачи на ЭВМ. Спиральная лампа бегущей волны как основа усилительного модуля. Способы повышения к.п.д. ЛБВО.

Лекция 11. Лампа бегущей волны с цепочкой связанных резонаторов. Особенности физических процессов в ЛБВО с цепочкой связанных резонаторов. Об особенностях физических процессов вблизи границ пропускания периодической замедляющей системы. Дискретный и волновой подход к анализу

взаимодействия в ЛВВО с цепочкой связанных резонаторов. Клистрон с бегущей волной. Линейные ускорители заряженных частиц.

Лекция 12. Карсинотрон. Взаимодействие электронного потока с обратной электромагнитной волной. Карсинотрон. «Чужие следы на песке...» - история изобретения лампы обратной волны Компфнером и Эшштейном. Теория пускового режима лампы обратной волны в приближении заданного поля. Нелинейное поведение лампы обратной волны (результаты стационарной нелинейной теории) Лампа обратной волны магнетронного типа.

Лекция 13. Карсинотрон как распределенная автоколебательная система. Натурный эксперимент и нестационарная теория ЛОВ; от монохроматических автоколебаний через автомодуляцию к динамическому хаосу. Релятивистский карсинотрон: нестационарная теория и результаты численного моделирования. Влияние сил пространственного заряда и отражений от концов замедляющей структуры на генерацию в релятивистской ЛОВ. Экспериментальное исследование сложной динамики в релятивистской ЛОВ. Релятивистский карсинотрон и радиолокация.

Лекция 14. Некоторые методы решения нелинейных нестационарных задач электроники. Метод «частиц в ячейке». Учет влияния пространственного заряда. Методы расчета полей в замедляющей системе: метод эквивалентных схем и уравнение возбуждения. Конечно-разностный метод решения нестационарных уравнений релятивистского карсинотрона в лагранжевых переменных. Математическое моделирование электронных приборов с помощью самосогласованной системы уравнений Максвелла - Власова. Применение метода функционального отображения к анализу нестационарных процессов в ЛВВ с запаздывающей обратной связью.

Лекция 15. Оротрон. Взаимодействие электронного потока с полями открытых резонаторов. Излучение Смита - Парселла. Оротрон. Основные уравнения оротрона. Некоторые результаты теории оротрона. Нестационарные процессы в оротроне. Методы повышения к.п.д. оротрона. Модификации оротрона.