МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования
«Новосибирский национальный исследовательский государственный университет»
(Новосибирский государственный университет, НГУ)

Физический факультет
Кафедра радиофизики

Согласовано, декан ФФ
_____ Блинов В.Е.
подпись
«04» 04 2026 г.

Рабочая программа дисциплины

ЭЛЕКТРОННЫЕ ПРИБОРЫ СВЧ

Направление подготовки **03.04.02 Физика**
Направленность (профиль): **Общая и фундаментальная физика**

Направление подготовки **03.04.01 Прикладные математика и физика**
Направленность (профиль): **Космическое и специальное приборостроение**

Форма обучения **Очная**

Семестр	Общий объем	Виды учебных занятий (в часах)				Промежуточная аттестация (в часах)				
		Контактная работа обучающихся с преподавателем			Самостоятельная работа, не включая период сессии	Самостоятельная подготовка к промежуточной аттестации	Контактная работа обучающихся с преподавателем			
		Лекции	Практические занятия	Лабораторные занятия			Консультации	Зачет	Дифференцированный зачет	Экзамен
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
1	72	24	8		18	18	2			2
Всего 72 часа / 2 зачетные единицы из них: - контактная работа 36 часов										
Компетенции ПК-1										

Руководитель программы
д.ф.-м.н. И.Б. Логашенко

Новосибирск, 2026

Содержание

1. Перечень планируемых результатов обучения по дисциплине, соотнесённых с планируемыми результатами освоения образовательной программы. 3

2. Место дисциплины в структуре образовательной программы. 4

3. Трудоёмкость дисциплины в зачётных единицах с указанием количества академических часов, выделенных на контактную работу обучающегося с преподавателем (по видам учебных занятий) и на самостоятельную работу. 4

4. Содержание дисциплины, структурированное по темам (разделам) с указанием отведённого на них количества академических часов и видов учебных занятий. 5

5. Перечень учебной литературы. 6

6. Перечень учебно-методических материалов по самостоятельной работе обучающихся. 6

7. Перечень ресурсов информационно-телекоммуникационной сети «Интернет», необходимых для освоения дисциплины. 7

8. Перечень информационных технологий, используемых при осуществлении образовательного процесса по дисциплине. 7

9. Материально-техническая база, необходимая для осуществления образовательного процесса по дисциплине. 7

10. Оценочные средства для проведения текущего контроля и промежуточной аттестации по дисциплине. 7

1. Перечень планируемых результатов обучения по дисциплине, соотнесённых с планируемыми результатами освоения образовательной программы

Дисциплина **«Электронные приборы СВЧ»** представляет собой курс, знакомящий студентов с физическими основами работы сверхвысокочастотных электронных вакуумных приборов, и предназначен для обучения студентов-физиков, специализирующихся в области радиофизики, физики ускорителей и промышленного применения этих приборов.

Целью освоения курса является: ознакомление с работой и принципами устройства различных электронных приборов СВЧ, в том числе с новыми методами генерации и усиления высокочастотной мощности, а также изучение основных характеристик, параметров и важнейших свойств, определяющих их применение для тех или иных исследований.

Создание современных ускорителей заряженных частиц для фундаментальных исследований и прикладных целей, исследования явлений в физике плазмы, ионосфере, астрофизике и других областях науки немыслимы без использования сверхвысокочастотных электронных приборов. Успех широкого применения электронных высокочастотных приборов обусловлен созданием разнообразных и замечательных по своим свойствам устройств, использующих преобразование энергии электронного пучка в электромагнитные колебания на сверхвысоких частотах. Данный курс позволяет студентам получить представление о классических и некоторых новых приборах СВЧ, используемых в современных научных исследованиях и практической деятельности.

Всюду, где это допускается уровнем знаний и подготовки студентов, материал лекционного курса увязывается с современными исследованиями в области радиофизики, ускорительной и экспериментальной технике. Специально обсуждаются темы текущей профессиональной научной литературы и планы дальнейших работ в институтах, в которых студенты планируют проходить научную практику. Материал курса увязывается с общефизическими и математическими дисциплинами, изучаемыми студентами-физиками (электродинамика, высшая алгебра и т.д.) и спецкурсами, параллельно излучающимися по данной специальности (электродинамика СВЧ, квантовые приборы СВЧ), а также лабораторным практикумом по электродинамике СВЧ, выполняемым в рамках отдельного специального практикума.

Дисциплина нацелена на формирование у обучающегося профессиональной компетенции:

Результаты освоения образовательной программы (компетенции)	Индикаторы	Результаты обучения по дисциплине
ПК-1 (ОПОП 03.04.02 Физика) Способен использовать специализированные знания в области физики при решении поставленных задач в исследовательской деятельности в соответствии с профилем подготовки в зависимости от специфики объекта исследования.	**ПК 1.1.** Применяет специализированные знания в области физики при решении конкретных задач в области научных исследований в соответствии с профилем подготовки в зависимости от специфики объекта исследования. **ПК 1.2.** Выбирает наиболее эффективные методы решения конкретных задач в области научных исследований в соответствии с профилем подготовки в зависимости от специфики объекта исследования.	**Знать** методы алгебры, математического анализа и решения дифференциальных уравнений; физические основы и явления, используемые в тех или иных приборах СВЧ, особенности классических приборов СВЧ; современные конструкции, параметры и способы применения высокочастотных приборов для конкретных исследовательских, научных и практических целей. **Уметь** оценивать параметры, конструкцию, инфраструктуру, необходимую для работы СВЧ приборов и эффективность конкретного электронного СВЧ прибора; выбрать адекватный электронный прибор для решения данной исследовательской научной или практической проблемы.
ПК-1 (ОПОП 03.04.01 Прикладные математика и физика) Способен осваивать и применять специализированные знания в области физико-	**ПК 1.1.** Применяет специализированные знания естественных и (или) физико-математических наук при решении поставленных задач в специализирован-	

математических и (или) естественных наук в своей профессиональной деятельности.	ной области своей профессиональной деятельности. **ПК 1.2.** Применяет классические и новые знания при решении поставленных задач в специализированной области своей профессиональной деятельности..	**Владеть** навыками выполнения физических исследований при решении научно-исследовательских и производственных задач с использованием современной аппаратуры и вычислительных средств; представлением о современном состоянии высокочастотного приборостроения и его применения в ускорительной технике, физике плазмы и других научных и практических целей.

2. Место дисциплины в структуре образовательной программы

Дисциплина «Электронные приборы СВЧ» реализуется в осеннем семестре 1-го курса магистратуры, обучающихся по направлениям подготовки 03.04.02, 03.04.01. Курс является одной из профессиональных дисциплин по выбору, реализуемых кафедрой радиофизики. Для его восприятия требуется предварительная подготовка студентов по таким физическим дисциплинам как электродинамика, а также по математике (дифференциальное и интегральное исчисления, ряды Фурье, численные методы решения систем линейных уравнений, теории функций комплексного переменного и др.).

Результаты освоения дисциплины «Электронные приборы СВЧ» используются при изучении дисциплины «Квантовые приборы СВЧ»

Освоение дисциплины необходимо при подготовке и выполнении выпускной квалификационной работы.

3. Трудоёмкость дисциплины в зачётных единицах с указанием количества академических часов, выделенных на контактную работу обучающегося с преподавателем (по видам учебных занятий) и на самостоятельную работу

Трудоёмкость дисциплины составляет: 2 зачётные единицы, 72 часа.

Форма промежуточной аттестации: 1 семестр – экзамен.

№	Вид деятельности	Семестр
		1
1	Лекции, ч.	24
2	Практические занятия, ч.	8
3	Лабораторные занятия, ч.	-
4	Занятия в контактной форме, ч. из них	36
5	аудиторных занятий, ч.	32
6	в электронной форме, ч.	-
7	консультаций, ч.	2
8	промежуточная аттестация, ч.	2
9	Самостоятельная работа, ч.	36
10	Всего, ч.	72

Реализация дисциплины предусматривает практическую подготовку при проведении следующих видов занятий, предусматривающих участие обучающихся в выполнении отдельных элементов работ, связанных с будущей профессиональной деятельностью: лекции, практические занятия, контроль посещаемости занятий, самостоятельная работа студента и её контроль преподавателем с помощью выборочного опроса, проверка индивидуальных заданий, консультация, экзамен.

4. Содержание дисциплины, структурированное по темам (разделам) с указанием отведённого на них количества академических часов и видов учебных занятий

Дисциплина «Электронные приборы СВЧ» представляет собой полугодовой курс, читаемый на 1-ом курсе магистратуры физического факультета НГУ в первом семестре. Общая трудоемкость дисциплины составляет 2 зачетные единицы, 72 академических часа.

Программа и основное содержание лекций (24 часа)

1. Общие сведения об особенностях СВЧ электроники (2 часа)

Развитие методов генерирования и усиления колебаний СВЧ.

2. Основные соотношения электроники (6 часов)

Уравнения Максвелла, уравнения движения и непрерывности. Комплексная теорема Умова-Пойнтинга. Возбуждение объемных резонаторов и волноводов заданными токами. Наведение тока при прохождении свободных зарядов через электронные приборы. Теорема Рамо. Угол пролета и коэффициент взаимодействия (пролетный коэффициент) электронного потока с электромагнитным полем объемных резонаторов.

3. Приборы О-типа. (2 часа)

Пролетный клистрон

Модуляция электронного потока по скорости. Группировка модулированного электронного потока в свободном пространстве. Электронно-волновой анализ процесса группировки. Конвекционный ток. Двухрезонаторный усилительный пролетный клистрон. Основные параметры пролетного клистрона. Клистрон в роли генератора. Многорезонаторные клистроны. Клистроны с распределенным взаимодействием.

Отражательный клистрон

Группировка электронов в однородном тормозящем поле. Конвекционный ток. Энергетические соотношения взаимодействия электронов с высокочастотным полем в отражательном клистроне. Электронный КПД и зоны генерации.

4. СВЧ - устройства с непрерывным взаимодействием типа О (4 часа)

Группировка электронов немодулированного потока в переменном поле. Конвекционный ток. Мощность взаимодействия немодулированного электронного потока с переменным полем. Монотрон. Группировка электронов в бегущей волне постоянной амплитуды. Замедляющие системы. Однородные и неоднородные замедляющие системы. Взаимодействие модулированного электронного потока с бегущей волной. Решение самосогласованной задачи взаимодействия электронов с полем замедляющей системы. Лампа бегущей волны – ЛБВО. Усилитель обратной волны - ЛОВО. Генераторы прямой и обратной волны.

5. Приборы М-типа (4 часа)

Магнетрон

Основные типы колебаний в магнетроне. Статический режим работы цилиндрического магнетрона со сплошным анодом. Парабола критического режима. Многорезонаторный магнетрон. Свойства резонансной системы магнетронных генераторов. Динамический режим работы многорезонаторного магнетрона. Пороговая прямая. КПД магнетрона. Коаксиальный и обращенный магнетроны. Релятивистский магнетрон.

ЛОВМ и ЛБВМ

Принцип действия. Характеристики ЛБВМ и ЛОВМ. Усилители М-типа. Амплитроны. Дематроны.

6. Гироприборы (4 часа)

Колебания типа циклотронной частоты в магнетронных генераторах. Гиротроны.

Лазеры на свободных электронах.

7. Приборы с модуляцией пучка путем его круговой развертки (2 часа)

Гирокон. Принцип работы гирокона. Основные параметры гирокона. Магникон и его принцип работы. Основные параметры магникона.

Программа практических занятий (8 часов)

1. Применение клистронов в ускорительной технике (2 часа)

2. Использование ЛБВ и ЛОВ для практических целей О (2 часа)

3. Особенности применение ЛОВМ и ЛБВМ в технике и быту (2 часа)

4. Применение гироприборов в физике плазмы (2 часа)

Самостоятельная работа студентов (36 часов)

Перечень занятий на СРС	Объем, час
Подготовка индивидуальной темы и изучение ее актуальности.	6
Изучение литературы по конкретной индивидуальной теме	6
Оформление результата в виде презентации или курсовой работы по выбранной индивидуальной теме	6
Подготовка к экзамену	18

Примеры тем индивидуальных заданий для самостоятельной работы:

1. Особенности (преимущества и недостатки) использования магнетронов в ускорительной технике.
2. Выбор схемы и мощности клистрона непрерывного действия для питания ускоряющих резонаторов накопителя.
3. Использование ламп бегущей волны при создании широкополосных ВЧ систем.

План выполнения самостоятельных индивидуальных заданий:

1. Выбор темы и ее изучение. Точная в смысловом отношении формулировка темы уточняет проблему, очерчивает рамки исследования, конкретизирует основной замысел.
2. Выявление литературы по теме и ее изучение в контексте решаемой проблемы.
3. Составление развернутого плана, который содержит общую характеристику предмета исследования, а также основные задачи, стоящие перед студентом. Он должен отражать очередность и логическую последовательность намеченных работ, а также наиболее существенные моменты каждого этапа исследования.
4. Оформление индивидуального задания в виде презентации.

5. Перечень учебной литературы

1. *Козырев Е. В.* Электронные приборы СВЧ: учеб. пособ. / Новосибирск, РИЦ НГУ, 2010. 155 с. (7 экз.), Режим доступа: http://e-lib.nsu.ru/dsweb/Get/Resource-6365/page0000.pdf.
2. *Карлинер М. М.* Электродинамика СВЧ: курс лекций / Новосибирск : НГУ, 1999. 226 с. (3 экз.)

6. Перечень учебно-методических материалов по самостоятельной работе обучающихся

1. *Козырев Е. В.* Электронные приборы СВЧ: учеб. пособ. / Новосибирск, РИЦ НГУ, 2010. 155 с. (7 экз.)
2. *Козырев Е. В.* Электродинамика СВЧ. Введение в практикум : учеб. пособ. / Новосибирск, РИЦ НГУ, 2024. 84 с. (10 экз.)
3. *Карлинер М. М.* Электродинамика СВЧ : курс лекций / Новосибирск, РИЦ НГУ, 2006. 257 с. Режим доступа: http://e-lib.nsu.ru/dsweb/Get/Resource-9665/page00000.pdf.
4. *Горелик Г. С.* Колебания и волны. Введение в акустику, радиофизику и оптику: учеб. пособ. для ун-тов / Под ред. С.М. Рытова. 2-е изд. М. : Физматгиз, 1959. 572 с. (2 экз.)
5. *Трубецков Д. И.* Лекции по сверхвысокочастотной электронике для физиков: в 2 т. / Физматлит, Т. 1. 2003 г. (2 экз.), Т. 2. 2004 г. (7 экз.),

6. Лабораторные работы по электродинамике СВЧ : специальный радиофизический практикум / сост. Е. В. Козырев, И. А. Запрягаев, К. Н. Чернов; Новосибирск : НГУ, 2008. 95 с. (15 экз.).
7. *Левичев А. Е.* Линейные СВЧ ускорители : учебное пособие / Редакционно-издательский центр НГУ, 2015. Режим доступа: http://e-lib.nsu.ru/dsweb/Get/Resource-315/page001.pdf.

7. Перечень ресурсов информационно-телекоммуникационной сети «Интернет», необходимых для освоения дисциплины

Для освоения дисциплины используются следующие ресурсы:
– электронная информационно-образовательная среда НГУ (ЭИОС);
– образовательные интернет-порталы;
– информационно-телекоммуникационная сеть Интернет.

7.1 Современные профессиональные базы данных

Не используется.

7.2. Информационные справочные системы

Не используются.

8. Перечень информационных технологий, используемых при осуществлении образовательного процесса по дисциплине

Для обеспечения реализации дисциплины используется стандартный комплект программного обеспечения (ПО), включающий регулярно обновляемое лицензионное ПО Windows и MS Office.

Использование специализированного программного обеспечения для изучения дисциплины не требуется.

9. Материально-техническая база, необходимая для осуществления образовательного процесса по дисциплине

Для реализации дисциплины используются специальные помещения:

1. Учебные аудитории для проведения занятий лекционного типа, практических занятий, курсового проектирования (выполнения курсовых работ), групповых и индивидуальных консультаций, текущего контроля, промежуточной и итоговой аттестации.

2. Помещения для самостоятельной работы обучающихся.

Учебные аудитории укомплектованы специализированной мебелью и техническими средствами обучения, служащими для представления учебной информации большой аудитории.

Помещения для самостоятельной работы обучающихся оснащены компьютерной техникой с возможностью подключения к сети "Интернет" и обеспечением доступа в электронную информационно-образовательную среду НГУ.

Материально-техническое обеспечение образовательного процесса по дисциплине для обучающихся из числа лиц с ограниченными возможностями здоровья осуществляется согласно «Порядку организации и осуществления образовательной деятельности по образовательным программам для инвалидов и лиц с ограниченными возможностями здоровья в Новосибирском государственном университете».

10. Оценочные средства для проведения текущего контроля и промежуточной аттестации по дисциплине

10.1 Порядок проведения текущего контроля и промежуточной аттестации по дисциплине

Текущий контроль

Текущий контроль осуществляется в ходе семестра путем контроля: посещаемости, выполнения самостоятельной работы студента, выборочного опроса и проверки индивидуальных заданий.

Промежуточная аттестация

Освоение компетенций оценивается согласно шкале оценки уровня сформированности компетенции. Положительная оценка по дисциплине выставляется в том случае, если заявленная компетенция ПК-1 сформирована не ниже порогового уровня в части, относящейся к формированию способности использовать специализированные знания в области знаний методов и способов постановки и решения задач создания высокочастотных систем ускорительных комплексов, физических, экспериментальных исследований и промышленных установок.

Окончательная оценка работы студента в течение семестра происходит на экзамене. Экзамен проводится в конце семестра в экзаменационную сессию по билетам в устной форме. Вопросы билета подбираются таким образом, чтобы проверить уровень сформированности компетенции ПК-1.

Вывод об уровне сформированности компетенций принимается преподавателем. Каждый вопрос билета оценивается от 0 до 5 баллов. Положительная оценка ставится, когда все компетенции освоены не ниже порогового уровня. Оценки «отлично», «хорошо», «удовлетворительно» означают успешное прохождение промежуточной аттестации.

Соответствие индикаторов и результатов освоения дисциплины

Таблица 10.1

<table>
<tr><th>Индикатор</th><th>Результат обучения
по дисциплине</th><th>Оценочные средства</th></tr>
<tr><td>ПК-1 (ОПОП 03.04.02)
ПК 1.1 Применяет специализированные знания в области физики при решении конкретных задач в области научных исследований в соответствии с профилем подготовки в зависимости от специфики объекта исследования.
ПК 1.2 Выбирает наиболее эффективные методы решения конкретных задач в области научных исследований в соответствии с профилем подготовки в зависимости от специфики объекта исследования.</td><td rowspan="2">Знать методы алгебры, математического анализа и решения дифференциальных уравнений; физические основы и явления, используемые в тех или иных приборах СВЧ, особенности классических приборов СВЧ; современные конструкции, параметры и способы применения высокочастотных приборов для конкретных исследовательских, научных и практических целей.
Уметь оценивать параметры, конструкцию, инфраструктуру, необходимую для работы СВЧ приборов и эффективность конкретного электронного СВЧ прибора; выбрать адекватный электронный прибор для решения данной исследовательской научной или практической проблемы.
Владеть навыками выполнения физических исследований при решении научно-исследовательских и производственных задач с использованием современной аппаратуры и вычислительных средств; представлением о современном состоянии высокочастотного приборостроения и его применения в ускорительной технике, физике плазмы и других научных и практических целей.</td><td rowspan="2">Оценка результатов самостоятельной работы студента в форме защиты мультимедийного проекта. Экзамен</td></tr>
<tr><td>ПК-1 (ОПОП 03.04.01)
ПК 1.1 Применяет специализированные знания естественных и (или) физико-математических наук при решении поставленных задач в специализированной области своей профессиональной деятельности.
ПК 1.2 Применяет классические и новые знания при решении поставленных задач в специализированной области своей профессиональной деятельности..</td></tr>
</table>

10.2. Описание критериев и шкал оценивания индикаторов достижения результатов обучения по дисциплине «Электронные приборы СВЧ»

Таблица 10.2

Критерии оценивания результатов обучения	**Шкала оценивания**
Сдача заданий: Посещение не менее 90% лекций и семинаров. Выполнение индивидуального задания и защита его в виде презентации. **Экзамен:** – полные ответы на вопросы экзаменационного билета. – корректное использование всех научных терминов. – четкие выводы и обобщения в ходе ответа. – уверенные ответы на дополнительные вопросы, имеющие принципиальное значение для данной дисциплины (мелкие неточности не влияют на оценку).	*Отлично*
Сдача заданий: Посещение не менее 75% лекций и семинаров в течение семестра. Индивидуальное задание выполнено и оформлено в виде презентации, однако в содержании или оформлении присутствуют несущественные недочеты. **Экзамен:** – дан ответ на экзаменационный билет, при этом единичные погрешности в терминологии студент исправляет сам или с помощью наводящих вопросов. – продемонстрирована способность к самостоятельному анализу и формулированию выводов. – ответы на дополнительные вопросы содержат незначительные пробелы, однако студент демонстрирует владение базовым материалом и фундаментальными понятиями курса.	*Хорошо*
Посещение не менее 60% учебных занятий в течение семестра. Индивидуальное задание выполнено, но носит поверхностный характер. Представленный материал содержит существенные ошибки, однако суть задания раскрыта в минимально необходимом объеме. **Экзамен**: – дан верный ответ только на один вопрос билета либо воспроизведены отдельные фрагменты лекций. – допускаются множественные неточности в формулировках; студент испытывает затруднения при оперировании ключевыми понятиями дисциплины. – продемонстрирован недостаточный уровень самостоятельного анализа; студент лишь повторяет готовые выводы из лекций. – присутствуют правильные ответы на дополнительные вопросы, имеющие принципиальное значение для освоения предмета.	*Удовлетво-рительно*
Сдача заданий: Посещаемость учебных занятий менее 60%. Индивидуальное задание не выполнено вообще, либо результаты работы не оформлены в виде презентации по утвержденной теме. **Экзамен:** – ответ на экзаменационный билет полностью отсутствует либо содержит критические ошибки, демонстрирующие отсутствие освоения дисциплины. – студент не владеет фундаментальной терминологией курса, а также не способен ответить на базовые дополнительные вопросы, имеющие ключевое значение для предмета.	*Неудовлетво-рительно*

10.3 Типовые контрольные задания и материалы, необходимые для оценки результатов обучения

Перечень вопросов к экзамену по дисциплине «Электронные приборы СВЧ»:

1. Особенности приборов СВЧ и их место в современных технологиях и научных исследованиях.
2. Какие частоты относятся к СВЧ диапазону.
3. Характеристика приборов О и М типа.
4. Чем отличаются приборы с кратковременным взаимодействием от приборов с длительным взаимодействием и их применение.
5. Основной математический аппарат электроники СВЧ.
6. Наведенный ток и особенности его использования в теории электронных приборов. Учет пролетного эффекта.
7. Комплексная теорема Умова–Пойнтинга применительно к возбуждению резонансных систем на конкретных примерах.
8. Использование резонаторов и их эквивалентное представление в электронике СВЧ.
9. Модуляция электронного потока по скорости (линейная теория). Группировка электронного потока в свободном пространстве.
10. Влияние объемного заряда на процесс группировки.
11. Двухрезонаторный усилительный пролетный клистрон.
12. Основные параметры пролетного клистрона: коэффициент усиления и способы его увеличения, кпд, нагрузочная характеристика.
13. Особенности работы клистрона в режиме генерации.
14. Клистрон – умножитель частоты, его особенности и эффективность.
15. Многорезонаторные клистроны и клистроны с распределенным взаимодействием.
16. Группировка электронов в отражательном клистроне. Электронный КПД и зоны генерации.
17. Монотрон. Группировка электронов немодулированного потока в переменном поле стоячей волны.
18. Однородные и неоднородные замедляющие системы.
19. Группировка электронов в бегущей волне.
20. Усилитель обратной волны – ЛОВО. Генераторы прямой и обратной волны типа О.
21. Статический режим работы цилиндрического магнетрона. Парабола критического режима.
22. Многорезонаторный магнетрон.
23. Динамический режим работы многорезонаторного магнетрона. Коаксиальный и обращенный магнетроны, особенности использования релятивистских электронов в магнетронах.
24. Принцип действия и характеристики ЛОВМ и ЛБВМ.
25. Принцип работы гиротронов.
26. Лазеры на свободных электронах, примеры и особенности действующих установок.
27. Гирокон. Принцип работы гирокона и его эффективность.
28. Магникон и его принцип работы.

Пример экзаменационного билета:

БИЛЕТ № 1

1. Комплексная теорема Умова-Пойнтинга. Возбуждение объемных резонаторов заданными токами.
2. Пролетный клистрон: модуляция электронного потока по скорости и группировка в свободном пространстве (линейная кинематическая модель), конвекционный сгруппированный ток.