**Электроника СВЧ**

**Лекция 7. Управление электронными потоками путем скоростной модуляции**

В предыдущей лекции было показано, что для образования коротких сгустков электронов может быть использована скоростная модуляция электронного потока, представляющая собой периодическое изменение скорости электронов. Электронный поток, промодулированный по скорости, автоматически приобретает при своем дальнейшем движении модуляцию по плотности – динамическое управление электронным потоком.

Периодическое изменение скоростей электронов может быть осуществлено, например, с помощью полого резонатора, возбуждаемого от внешнего источника СВЧ колебаний (р.7.1).

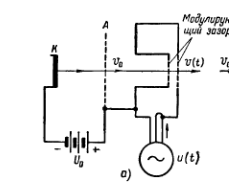


Рис.7.1. Полый резонатор, используемый для скоростной модуляции электронного потока

Для того, чтобы получить наиболее сильное изменение скоростей, электронный поток следует пропускать через отверстия в той части резонатора, где сосредоточено преимущественно электрическое поле. В случае тороидального резонатора, приведенного на рис., таким участком является емкостной зазор, который часто выполняется в виде двух параллельных сеток. Направление начальной скорости электронов, входящих в зазор, должно по возможности совпадать с направлением электрических силовых линий.

**а. Уравнение скоростной модуляции**

Рассмотрим процесс скоростной модуляции электронов гармоническим напряжением *u = Um sinωt*, наложенным на электроды идеального плоского двухсеточного зазора, приведенного на рис.7.2.

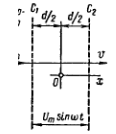


Рис.7.2. Идеальный плоский двухсеточный зазор полого резонатора

Не будем сначала учитывать конечного угла пролета электрона через зазор, полагая его много меньше периода высокочастотного колебания. Тогда кинетическая энергия одиночного электрона, вошедшего в зазор с начальной скоростью , на выходе из зазора должен иметь величину энергии (7.1)

Через *t* здесь обозначен момент прохождения электрона через зазор. Отсюда скорость электрона после прохождения зазора будет равна

(7.2)

Будем считать амплитуду модулирующего высокочастотного напряжения *Um*  много меньше ускоряющего напряжения . Раскладывая выражение (7.2) по малому параметру , получаем

При можно отбросить все члены выше первой степени и получить:

(5.3)

где

(5.4)

Уравнение (5.3) показывает, что при малой амплитуде гармонического напряжения модуляция электронного потока по скорости также происходит по гармоническому закону, при этом переменная составляющая скорости *v1* должен быть много меньше начальной скорости *v0*.

При конечном угле пролета зазора анализ скоростной модуляции по приведенным выше уравнениям перестает быть справедливым, поскольку изменение кинетической энергии электрона определяется не только величиной напряжения в момент входа электрона в зазор, но и законом изменения напряжения за время пролета.

Для расчета скоростной модуляции при конечном угле пролета, рассматривая изменение энергии электрона в зазоре под воздействием высокочастотного электрического поля, применяется тот же подход, что и при рассмотрении наведенного модулированным по плотности электронным потоком тока.

Выберем начало координат *x* в середине зазора. Энергия, приобретенная одиночным электроном при прохождении пути *dx* внутри зазора, равна

Полное приращение энергии электрона *ΔW* в результате прохождения через весь зазор определим путем интегрирования этого выражения по ширине зазора, т.е. от *–d/2* до *+d/2*. Обозначив через *t0*  момент прохождения рассматриваемым электроном центра зазора и пренебрегая изменением скорости электрона внутри зазора, можно записать



Тогда приращение кинетической энергии электрона получаем в виде



где величина *Θ=ωd/v0* –угол пролета невозмущенным электроном модулирующего зазора, а *М* – коэффициент взаимодействия электронного потока с полем зазора.

Полная кинетическая энергия электрона вошедшего в зазор со скоростью , на выходе из зазора имеет величину



Подставляя выражение для приращения кинетической энергии, получаем скорость электрона на выходе из зазора



Полагая амплитуду модулирующего напряжения *Um* много меньше постоянного ускоряющего напряжения *U0* и разлагая подкоренное выражение в степенной ряд, получаем



Или пренебрегая членами ряда имеющими высшие степени имеем

(5.5)

где

(5,6)

Таким образом, коэффициент взаимодействия электронного потока с зазором *М* играет важную роль не только при наведении тока в выходных устройствах ламп, но и в управляющих зазорах, служащих для модуляции электронного потока по скорости. График зависимости коэффициента *М* от угла пролета *Θ* приводился на прошлой лекции. Наибольшая амплитуда скоростной модуляции достигается при *М*→1, т.е. когда *Θ*→0. Чем больше угол пролета *Θ,* тем менее эффективен зазор в отношении скоростной модуляции. При *Θ=2π* скоростная модуляция отсутствует. Использование *Θ>2π* также не имеет практического смысла из-за малой величины коэффициента *М.*

Полученное уравнение скоростной модуляции позволяет сделать и другой вывод. В случае конечного угла пролета *Θ* плоский зазор, служащий для скоростной модуляции, может быть заменен эквивалентным зазором нулевой протяженности, расположенным в центре реального зазора, при условии уменьшения амплитуды модулирующего напряжения на величину коэффициента *М.*

При угле пролета, равном *π,* эффективность скоростной модуляции уменьшается пропорционально величине *М,* равной 0,635. Следовательно, действие конечного угла пролета в данном случае сводится лишь к тому, что для получения заданной модуляции необходимо примерно на 30% повысить амплитуду модулирующего напряжения в сравнении с «идеальным» режимомнулевого угла пролета.

**Задача.** Электроны, эмитируемые катодом ЭВП СВЧ, ускоряются напряжением U0=5 кВ и попадают в плоский управляющий двухсеточный зазор протяженностью d=2 мм, находящийся под этим же напряжением относительно катода. Какова амплитуда переменной составляющей скорости электронов на выходе из зазора, если к нему приложено высокочастотное напряжение амплитудой 100В и частотой 5 ГГц.

На выходе из управляющего зазора скорость электрона

*v = v0 + v1sinωt,*

где а

Скорость электронов на влете в зазор

м/c

Угол пролета электроном зазора

Θ=2πfτ=2πfd/v0=(2\*3,14\*5\*109\*2\*10-3)/(4,2\*107)=1,5

Коэффициент взаимодействия

Амплитуда переменной составляющей скорости электронов на выходе из зазора

м/с

Следует отметить, что в отличии от нулевого зазора, учет конечного угла пролета в пределах 0≤Θ≤2π приводит к тому, что зазор, в который поступает немодулируемый электронный поток, обладает конечной активной проводимостью *Gэл*, имеющей положительный знак. Эта проводимость обуславливает в среднем поглощение СВЧ энергии от источника входного сигнала.

Важной особенностью метода скоростной модуляции является то, что катод не входит в состав высокочастотной цепи лампы. Это позволяет сообщить электронам значительные скорости, прежде чем электронный поток поступает в управляющий зазор. Тем самым даже при не очень узких зазорах на весьма высоких частотах удается обеспечить малую величину пролетного угла, во всяком случае, не превышающую *π.* С другой стороны, выделение катода из высокочастотного управляющего промежутка позволяет более рационально выбирать форму, конструкцию и размеры поверхности катода, исходя из эмиссионной способности, монтажа и др.

**б. Преобразование модуляции по скорости в модуляцию электронного потока по плотности.**

Конечной целью модуляции по скорости являетсяполучение конвекционного тока с возможно большей переменной составляющей

*Iконв = I0 +i(t)*

Переход модуляции по скорости в модуляцию потока по плотности должен происходить автоматически за пределами управляющего устройства в пространстве между ним и выходным устройством.

В электронике СВЧ основное применение нашли два метода преобразования потоков, имеющих модуляцию по скорости: так называемый *метод дрейфа и метод тормозящего поля.* Первый метод основан на движении электронов по инерции в пространстве, свободном от внешних постоянных и переменных полей. Второй – на движении электронов в пространстве с постоянным во времени продольном тормозящем полем. Принципиальные схемы устройств, обеспечивающих оба вида преобразования, приведены на рис.7.3.

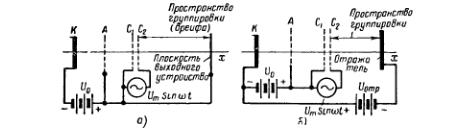


Рис.7.3. Схема преобразования модуляции по скорости в мдуляцию электронного потока по плотности методами дрейфа (а) и тормозящего поля (б)

На пространственно-временной диаграмме, построенной для случая использования дрейфа, приведенной на рис.7.4, рассмотрим движение электронов, прошедших модулирующий зазор в различные моменты времени *t0*.

Электроны типов *1* и *2,* прошедшие зазор в моменты нулевого высокочастотного поля, не изменяют своих скоростей. Электроны типа *3* скачком увеличивают свою скорость, в то время как электроны типа *4,* проходя зазор в момент максимального тормозящего поля, несколько замедляются по сравнению с электронами типа *1* и *2*.

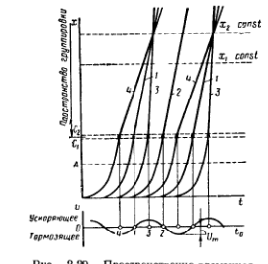


Рис.7.4. Пространственно-временная диаграмма преобразования модуляции по скорости в модуляцию по плотности методом дрейфа

Двигаясь в пространстве дрейфа по инерции, «быстрые» электроны типа *3* постепенно догоняют электроны типа *1*, прошедшие зазор на четверть периода раньше. В то же время «медленные» электроны типа *4* отстают от электронов типа *2,* не изменивших своей скорости. В результате в некоторой плоскости *x=const*, где может быть расположен выходной зазор, электронный поток оказывается сгруппированным, т.е. приобретает модуляцию по плотности. Глубина модуляции, как видно из рис., зависит от расстояния между управляющим и выходным устройствами, т.е. от времени пролета в пространстве дрейфа. При фиксированной частоте и при заданных значениях напряжений *U0* и *Um* существует оптимальная длина пространства дрейфа, обеспечивающая наибольшую переменную составляющую конвекционного тока в выходном устройстве.

Из рассмотренной диаграммы можно сделать важные качественные выводы о законе образования электронных сгустков при преобразовании скоростной модуляции потока методом дрейфа:

1. *Центрами сгустков, приходящих в выходное устройство при преобразовании методом дрейфа, являются электроны, приходящие в середину зазора в момент нулевого поля при переходе поля от тормозящего в ускоряющее.*
2. *Период следования сгустков равен периоду модулирующего напряжения.*

Рассмотрим схему преобразования модуляции по скорости в модуляцию электронного потока по плотности методом тормозящего поля. В этом случаев пространстве позади управляющего зазора имеется продольное постоянное во времени тормозящее электрическое поле, создаваемое специальным электродом – отражателем, который находится под отрицательным потенциалом относительно ускоряющего электрода и управляющего зазора. В результате электроны, вышедшие из управляющего зазора промодулированными по скорости, не достигая отражателя, движутся обратно по направлению к управляющему зазору (рис.7.5).

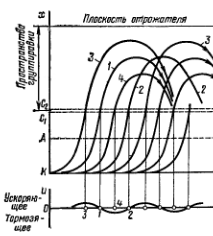


Рис. 7.5. Пространственно-временная диаграмма преобразования модуляции по скорости в модуляцию по плотности методом тормозящего поля

Анализ процесса преобразования произведем качественно с помощью пространственно-временных диаграмм (р.7.5), из которых видно, что электроны *3* и *4*, прошедшие управляющий зазор соответственно при максимально ускоряющем и максимально тормозящем полях, группируются возле электрона типа *1*.

Таким образом*, в случае преобразования методом тормозящего поля сгустки образуются относительно электронов, прошедших центр управляющего зазора в момент нулевого высокочастотного поля при переходе его от ускоряющего к тормозящему.*

В результате рассмотрения этих методов преобразования скоростной модуляции электронов с помощью управляющих зазоров в модуляцию электронного потока по плотности отметить следующие особенности. В случае применения для преобразования метода дрейфа модуляция по плотности может быть использована в выходном устройстве, находящемся позади управляющего устройства, при прямом однократном пролете электронов. Этот способ лежит в основе *пролетных двухрезонаторных и многорезонатолных клистронов.* В случае применения для преобразования метода тормозящего поля удобнее всего реализовать модуляцию по плотности в плоскости, совпадающей с плоскостью модулирующего зазора, что позволяет совместить управляющее и выходное устройства в одном зазоре. Этот принцип лежит в основе *отражательных клистронов.*

**в. Нерезонаторные устройства для создания скоростной модуляции**

Рассматриваемые выше управляющие устройства являются узкополлосными, т.к. имеющийся у них высокочастотный зазор входит в состав полого резонатора. При несовпадении частоты сигнала и резонансной частоты резонатора амплитуда СВЧ Колебаний резко уменьшается, что приводит к ослаблению скоростной модуляции. Поэтому во время работы необходимо настраивать модулирующий резонатор, впрочем, как и выходной резонатор, на частоту сигнала, что не всегда не только удобно, но и возможно.

Для создания скоростной модуляции в широкой полосе частот можно перейти от резонансных систем с кратковременным взаимодействием к нерезонансным системам с длительным взаимодействием электронного потока с полем бегущей волны. Тогда в качестве модулирующего устройства может быть, применена замедляющая система – волноведущая система с замедленной волной, вдоль которого пропускается электронный поток.

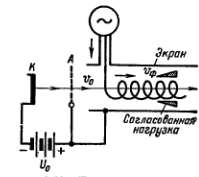


Рис.7.6. Применение спиральной замедляющей системы для скоростной модуляции электронного потока

На рис. 7.6 приведен отрезок замедляющей системы в виде спирали, на вход которой подан СВЧ сигнал. На втором конце замедляющей системы находится согласованная нагрузка, в результате чего в линии устанавливается режим бегущей волны. В эту систему поступает ускоренный до скорости *v0*  электронный поток.

Для качественного объяснения скоростной модуляции рассмотрим случай синхронизма, т.е. равенства скорости электронов *v0 и* фазовой скорости *vф*замедленной электромагнитной волны, распространяющейся в том же направлении.

На рис.7.7 построен график распределения продольной составляющей *Еz*  бегущей волны в системе координат, двигающейся со скоростью волны *vф*.

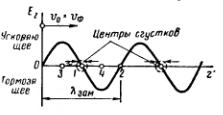


Рис.7.7. Получение скоростной модуляции при длительном взаимодействии электронного потока с бегущей замедленной волной в режиме фазового синхронизма

При условии *v0= vф* электроны типа *1* и *2* остаются неподвижными относительно рассматриваемой системы координат, т.к. высокочастотное поле в этих точках равно нулю. Электроны типа *3* непрерывно ускоряются продольным полем волны; скорость этих электронов становится больше *v0*. Соответственно электроны типа *4*, оказавшиеся в области максимального тормозящего поля, уменьшают свою скорость. Таким образом, в потоке создается периодическая модуляция по скорости, нарастающая по мере движения электронов вдоль замедляющей системы.

Результатом такой модуляции по скорости является модуляция электронного потока по плотности. При этом центрами сгустков являются электроны типа *1*, расположенные в областях перехода высокочастотного поля *Еz ч*ерез нуль от ускоряющей к тормозящей полуволне.

Чем слабее дисперсия, тем шире полоса частот, в пределах которой электроны остаются в синхронизме с волной при неизменной величине постоянного ускоряющего напряжения U0.

Сравнивая эффективность модуляции с помощью высокочастотного зазора и замедляющей системы можно прийти к следующему выводу. При одной и той же мощности входного сигнала напряженность продольного высокочастотного поля в замедляющей системе значительно меньше чем в полом резонаторе. Однако угол пролета электронов через замедляющую систему в принципе ничем не ограничен. Путь, на протяжении которого поле модулирует электронный поток, может быть в замедляющей системе значительно большим, нежели в зазоре полого резонатора. В результате этого переменная составляющая скорости электронного потока на выходе замедляющей системы может быть сделана такого же порядка, как в высокодобротных системах с кратковременным взаимодействием.