

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ ПЕНЗЕНСКОЙ ОБЛАСТИ
ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ НЕТИПОВОЕ ОБЩЕОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ
УЧРЕЖДЕНИЕ
ПЕНЗЕНСКОЙ ОБЛАСТИ «ГУБЕРНСКИЙ ЛИЦЕЙ»

Областная научно-практическая конференция «Старт в науку»

Секция «Физика»

СВЧ-ВОЛНЫ
МАГНЕТРОН

Выполнил: учащийся

11 физико-математического класса

Облизин Максим

Научный руководитель: учитель физики

Запорожец Дмитрий Дмитриевич

Пенза, 2020

Содержание

Введение.....	3
Глава 1. История развития сверхвысоких частот.....	4
Глава 2. Устройство и принцип работы магнетрона.....	6
Глава 3. Портативный СВЧ-излучатель.....	9
Глава 4. Сборка СВЧ-излучателя	11
Глава 5. Влияние СВЧ-поля и защита от его воздействия.....	16
Заключение.....	18
Список используемой литературы.....	19

Введение

В наше время практически все знают, что такое сверхвысокие частоты (далее - СВЧ). В данном частотном диапазоне работают микроволновые печи, радиолокационное оборудование и мобильная связь.

Конечно, СВЧ-излучение несёт много пользы, однако, оно способно нанести немалый ущерб, например, высокочастотные колебания вызывают токи Фуко в металле, что приводит к его разогреву.

Источник СВЧ-излучения есть практически у каждого - это микроволновая печь, главным элементом которой является магнетрон - СВЧ-излучатель достаточно большой мощности. Однако, многие не задумываются над тем, насколько опасным может стать этот прибор в случае неправильной эксплуатации.

Целью данного проекта является изучение явления СВЧ-излучения и методов его получения.

Для реализации проекта поставлены следующие задачи:

- 1) изучить историю возникновения и развития СВЧ;
- 2) изучить устройство и принцип работы магнетрона;
- 3) найти способ подключения магнетрона при условии портативности;
- 4) собрать установку для получения СВЧ при безопасной для человека мощности;
- 5) изучить влияние полученных СВЧ-волн на работу электронных компонентов.

Таким образом, данный проект носит приоритетно прикладной характер и может быть полезен юным радиотехникам в безопасном изучении СВЧ-диапазона.

Глава 1. История развития сверхвысоких частот

Микроволновое излучение, сверхвысокочастотное излучение (далее СВЧ-излучение) - это электромагнитное излучение, включающее в себя дециметровый, сантиметровый и миллиметровый диапазоны радиоволн (длина волны от 1 м - частота 300 МГц до 1 мм - 300 ГГц).

В 1912 году швейцарский физик Генрих Грайнахер изучал способы вычисления массы электрона. Он собрал установку, в которой внутри магнита был помещен электровакуумный диод с цилиндрическим анодом вокруг стержневидного катода. Ему не удалось измерить массу электрона из-за проблем с получением достаточного уровня вакуума в лампе, однако в ходе работы были разработаны математические модели движения электронов в электрических и магнитных полях.

Американский физик-радиотехник Альберт Халл использовал данные модели при попытках обойти патенты на триод. Халл планировал использовать для управления потоком электронов между катодом и анодом изменяющееся магнитное поле вместо постоянного электрического. В результате он создал лампы, переключающие режим через изменение соотношения магнитных и электрических полей. В 1921 году Халл предложил термин «магнетрон», опубликовал несколько статей об его устройстве и получил патенты. Магнетрон Халла не был предназначен для получения высокочастотных электромагнитных волн.

В 1924 году чехословацкий физик Августин Жачек и германский физик Эрих Хабан независимо обнаружили возможность генерации магнетроном дециметровых волн (порядка 100 МГц - 1 ГГц).

С этого момента начинается активное изучение данного частотного диапазона и методов получения СВЧ-колебаний.

К 1936 - 1937 годам мощность генераторов на базе магнетрона была повышена в несколько раз (до сотен Вт на волне с длиной 9 см) путём

создания многорезонаторного магнетрона с использованием массивного медного анода с несколькими резонаторами и охлаждением.

В 1935 году французский учёный Морис Понт с сотрудниками из парижской фирмы создали электронную лампу с вольфрамовым катодом, окружённым резонаторными анодными сегментами. Она была предшественницей магнетронов с резонаторными камерами.

В 1940 году опубликована конструкция многорезонаторного магнетрона Алексеева - Малярова, обеспечивающего 300-ваттное излучение на волне 10 сантиметров, созданного в 1936 -1939 годах.

В 1940 году британские физики Джон Рэндалл и Гарри Бут изобрели резонансный магнетрон. Новый магнетрон давал импульсы высокой мощности, что позволило разработать радар сантиметрового диапазона. Радар с короткой длиной волны позволял обнаруживать более мелкие объекты. Кроме того, компактный размер магнетрона привёл к резкому уменьшению размеров радарной аппаратуры, что позволило устанавливать её на самолетах.

Начиная с 1960-х годов магнетроны получили применение в СВЧ-печах для домашнего использования.

На сегодняшний день, конструкция магнетрона не претерпела существенных изменений, а основными областями применения данных радиоламп остаются радиолокация и разогрев металлов и жидкостей.

Современные магнетроны могут работать на различных частотах от 0,5 до 100 ГГц, с мощностями от нескольких Вт до десятков кВт в непрерывном режиме и от 10 Вт до 5 МВт в импульсном режиме при длительностях импульсов от долей до десятков микросекунд.

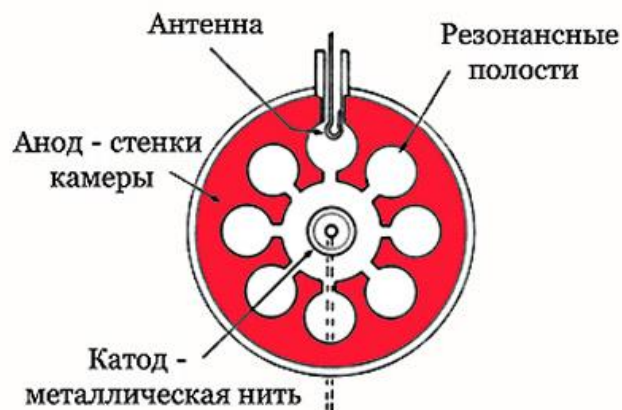
На сегодняшний день, магнетрон - последний тип массово производимого радиотехнического электровакуумного прибора после свёртывания производства кинескопов в начале 2010 годов.

Глава 2. Устройство и принцип работы магнетрона

В связи с тем, что магнетроны применяются как в радиолокации, так и в микроволновых печах, их конструкции несколько различны.

Магнетрон является вакуумным диодом с подогреваемым (чаще прямонакальным) катодом и массивным анодным блоком.

Анодный блок представляет собой толстостенный металлический цилиндр (в большинстве случаев медный) с полостями в стенках. Эти полости являются объемными резонаторами, которые создают колебательную кольцевую систему.



Упрощённая схема магнетрона.

Существует три вида резонаторов: лопаточные, щель-отверстие и щелевые.

В настоящее время, наиболее распространёнными являются магнетроны с лопаточной резонаторной системой. Они более просты в изготовлении и содержат меньшую массу меди. Практически все магнетроны для СВЧ-печей малой мощности имеют именно такую конструкцию резонатора.

Достаточно важной частью магнетрона является система охлаждения.

Магнетроны, используемые в радиолокационных станциях, рассчитаны на большую импульсную мощность, однако их средняя мощность

относительно невелика. Следовательно, используется воздушное принудительное или естественное охлаждение.

Магнетроны для СВЧ-печей работают в непрерывном режиме и обладают достаточно большой мощностью. Для маломощных устройств (300 - 1500 Вт) применяется принудительное воздушное охлаждение, для более мощных - жидкосное.

Вне зависимости от предназначения магнетрона и типа резонаторной системы, принцип работы остается одинаковым.

В магнетронах применяется движение электронов в перпендикулярных магнитных и электрических полях, созданных в зазоре между анодом и катодом. Между ними подается напряжение (анодное), которое образует радиальное электрическое поле. Под воздействием этого поля электроны вырываются из нагретого катода и устремляются к аноду. Анодный блок находится между полюсов магнита, образующего магнитное поле, которое направлено вдоль оси магнетрона. Магнитное поле действует на электрон и отклоняет его на спиральную траекторию. Электроны возбуждают в объемных резонаторах колебания высокой частоты. Отдельно каждый резонатор является колебательной системой. Магнитное поле концентрируется внутри полости, а электрическое поле сосредоточено у щелей. Энергия выводится из магнетрона с помощью индуктивной петли, расположенной в одном из резонаторов.

Магнитная система в подавляющем большинстве случаев реализуется на постоянных магнитах.

В магнетронах, для использования в СВЧ-печах, вывод энергии осуществляется через небольшой волновод на антенну, закреплённую непосредственно на самом магнетроне на конце волновода.

В промышленных магнетронах вывод энергии может осуществляться на разъем, предполагающий соединение антенны через коаксиальный кабель.

Отличительной особенностью "бытового" магнетрона является встроенный LC-фильтр в цепи накала, предотвращающий проникновение СВЧ-помех в цепь питания.

Рабочая частота магнетрона является неизменяемой величиной (за исключением приборов с настраиваемой частотой) и зависит лишь от конструктивных особенностей. Превышение или занижение анодного напряжения приводит к срыву генерации. Изменение анодного напряжения в рабочем диапазоне приводит к незначительным отклонениям от расчётной частоты генерации.

Глава 3. Портативный СВЧ-излучатель

В настоящее время, наиболее доступными являются магнетроны, используемые в бытовых микроволновых печах. Их рабочая мощность, по сравнению с мощностью магнетронов, используемых в радиолокации, относительно невелика и лежит в диапазоне 400 - 3000 Вт. Рабочий режим может быть постоянным, либо импульсным. Среднюю мощность излучения можно изменять, увеличивая или уменьшая коэффициент заполнения питающего тока.

Рабочее напряжение бытового магнетрона лежит в пределах 3 - 5 кВ. Напряжение накала не превышает 6 В, а наиболее распространенными значениями являются 3 - 4 В.

Чаще всего частота генерации бытового магнетрона лежит около значения 2450 МГц.

Типовая схема включения магнетрона предполагает питание от высоковольтного трансформатора. Для ограничения тока используется конденсатор. Выпрямитель тока может быть собран как на одной диоде (питание полуволной), так и на четырех (диодный мост, питание пульсирующим током).

Для работы магнетрона в данном режиме нужна достаточно большая подводимая мощность, что затрудняет использование аккумуляторов в качестве источника энергии. К тому же, высокая выходная мощность может быть опасна для человека ввиду термического воздействия (нетермическое влияние СВЧ-поля на вещество не наблюдалось), вследствие которого может произойти свертывание белка.

Из выше описанного следует, что для безопасного использования магнетрона (защита от СВЧ-поля заведомо отсутствует) средняя мощность излучения не должна превышать 100 мВт/см^2 на расстоянии 50 см от антенны [1].

Для получения малых мощностей, магнетрон должен работать в импульсном режиме. Этого можно достичь, используя разрядник и конденсатор небольшой емкости, заряжаемый через резистор. В этом случае среднюю мощность излучения можно будет регулировать, изменяя силу тока, заряжающего конденсатор. Мощность единичного импульса будет зависеть только от технических характеристик магнетрона.

Также импульсный режим решает проблему энергопотребления, так как общая потребляемая мощность остается неизменной при любой мощности импульса.

Немаловажным аспектом является питание нити накала. Для этого хорошо подходят литиевые аккумуляторы на 3,7 В. Однако, низковольтная часть оказывается соединенной с "-" высоковольтного питания, что должно быть учтено при сборке установки.

Таким образом, нужно как минимум две батареи: для питания накала и для питания высоковольтного преобразователя. Ток накала достаточно велик, следовательно желательно использование в цепи электромагнитного реле.

Дальнейшие аспекты конструкции будут рассмотрены в следующей главе, для случая применения магнетрона 2M217J:

- полная мощность магнетрона - 580 ± 30 Вт;
- ток анода $\approx 0,2$ А;
- напряжение анода - $3,9 \pm 0,2$ кВ;
- ток накала - 10 ± 2 А;
- напряжение накала - 2,8-3,7 В;
- рабочая частота - 2456 МГц.

Глава 4. Сборка СВЧ-излучателя

За основу для СВЧ-излучателя взят бытовой магнетрон с принудительным воздушным охлаждением. Так как требуется получить небольшую среднюю мощность излучения, необходимость принудительного охлаждения пропадает. Если закрепить магнетрон так, чтобы ребра охлаждения располагались вертикально, то в режиме "ожидания" (подано только накальное напряжение) его температура не поднимается выше 80 С°.

Питание накала магнетрона реализовано на литий-ионных аккумуляторах. Ток холодного старта достаточно высок и ограничивается лишь сопротивлением нити накала и небольшого дросселя. Следовательно, для подключения аккумуляторов используется электромагнитное реле.



Блок управления накалом.

Рабочее напряжение на аноде, для используемого магнетрона, составляет 3,9 кВ. Наиболее оптимальный метод создания коротких импульсов - использование разрядника в цепи питания магнетрона. Следовательно, для надёжной работы схемы, требуется напряжение, превышающее рабочее значение для магнетрона как минимум на значение напряжения пробоя разрядника.

Высоковольтный источник реализован по системе двойного преобразования.

Напряжение 12 В от свинцово-кислотного аккумулятора повышается небольшим преобразователем до 40 В и через резистор заряжает конденсатор. Подключение преобразователя к аккумулятору осуществляется через релле.

Разряд конденсатора осуществляется через диод, шунтирующий резистор. Это позволяет получить большой пусковой ток, при небольшой рабочей мощности.



Первая ступень преобразования (40 В).

Следующей ступенью преобразования является непосредственно высоковольтный источник.



Высоковольтный преобразователь.

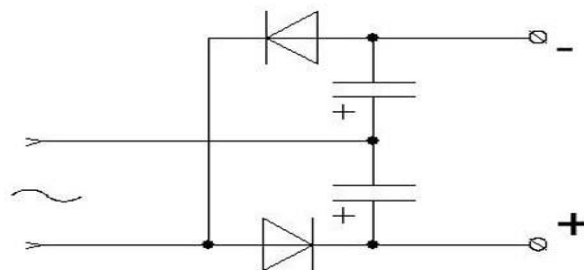
Он подключается к источнику 40 В через релле, которое управляется не на прямую, а через другое релле, рассчитанное на гораздо меньший ток.

Катушки релле шунтированы пленочными конденсаторами небольшой емкости и диодами. Такая система минимизирует риск частого включения и выключения релле из-за плохого контакта в кнопке, отвечающей за переход магнетрона в рабочий режим.

Наиболее важной частью высоковольтного блока питания является трансформатор. В качестве магнитопровода использован сердечник от трансформатора строчной развертки (использование строчного трансформатора не предполагалось из-за слишком маленького тока). Высоковольтная и низковольтная обмотки выполнены отдельно.

Высоковольтная обмотка содержит 350 витков одножильным проводом. Низковольтная - 10 витков с отводом от середины. Изоляция между сердечником и обмотками делается с учётом того, что вся схема строится по принципу общего минуса и возможен пробой с высоковольтной обмотки на низковольтную [2].

Импульсное напряжение с трансформатора подается на умножитель.



Умножитель на 2.

В данном случае достаточно умножителя на 2 (на выходе получается 6,5 кВ без нагрузки). Напряжение с конденсаторов умножителя поступает на разрядник и далее на магнетрон.

Емкость конденсаторов умножителя невелика (в частном случае 1000 пФ). Следовательно, для достижения более резких включений магнетрона, проходной конденсатор отключен от анода.



Высоковольтный блок питания.

Все релле в системе запитаны от отдельного аккумулятора 12 В.

Система помещена в фанерный корпус. Управление накалом и первой ступенью преобразования (40 В) осуществляется выключателями, выведенными на ручку устройства. Переход мегнетрона в рабочий режим происходит при включении высоковольтного преобразователя. За это отвечает кнопка с последовательно соединенным с ней выключателем, для защиты от случайного нажатия. Такое исполнение желательно, так как вся низковольтная часть (и кнопка в том числе) соединена с "-" высоковольтного источника, в то время как на аноде магнетрона, конструктивно соединенном с его корпусом, в рабочем режиме получают импульсы около 4 кВ.



Ручка управления.

Для достижения направленности излучения используется конический экран, закрепленный к корпусу магнетрона.



Конический экран.

Направленность излучения и вытянутая форма корпуса обеспечивают минимальное воздействие СВЧ-излучения на оператора.

Выходная мощность излучения установки в данном случае составляет менее 50 Вт (50 Вт - мощность потребления второй ступени преобразования, а КПД в любом случае менее 100%). Следовательно, мощность излучения на выходе из конуса (площадь сечения - 100 см², расстояние от антенны магнетрона - 18 см) не превышает 0,5 Вт/см². На расстоянии 50 см от антенны мощность излучения становится безопасной при условии кратковременного воздействия.



Общий вид излучателя.

Глава 5. Влияние СВЧ-поля и защита от его воздействия

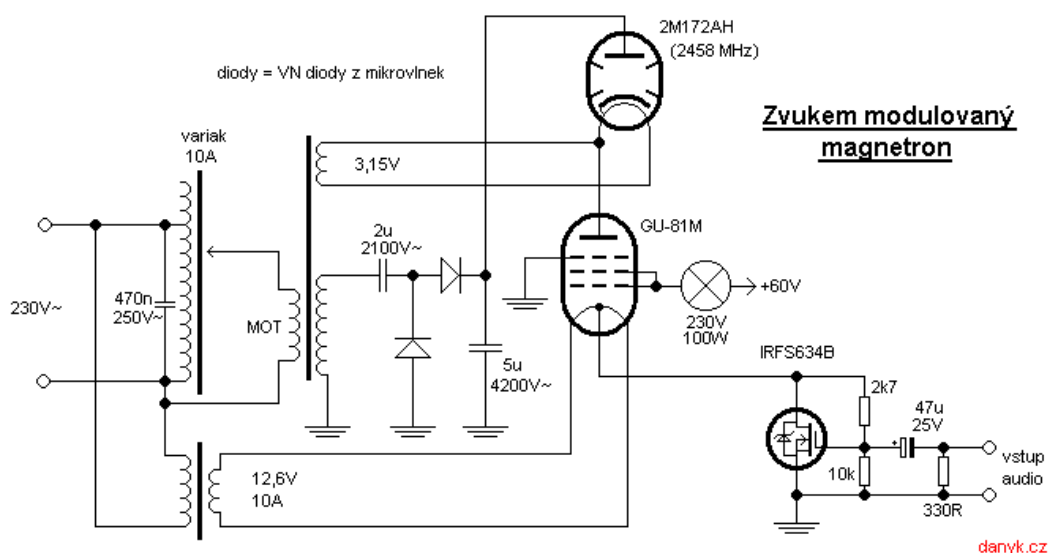
Влияние СВЧ-поля на живые организмы заключается лишь в нагреве тканей, что ведёт к риску свёртывания белка, при плохом теплоотводе (например, в глазах) и перегреве [3].

Нетепловое воздействие СВЧ-излучения на человека до конца не изучено. Микроволны - это неионизирующее излучение, то есть оно не вызывает ионизации молекул и не меняет структуру вещества. Однако, замечено, что люди, работающие вблизи сильных источников радиоволн, чаще страдают бессонницей, головными болями, повышенной утомляемостью.

СВЧ-излучение магнетрона, благодаря большой мощности, способно заглушать Wi-fi частоту (в частности 2,4 ГГц), а также вносить помехи в теле-диапазон частот, мобильную связь и мешать передачи данных через Bluetooth.

Устройства, рассчитанные на приём частоты 2,4 ГГц могут быть повреждены, так как мощность излучения магнетрона многократно превышает мощность излучения, с которой предполагается работа этих приборов (в данном случае речь идёт о полной мощности магнетрона, не ограниченной методом, изложенным в абзаце 7 главы 3).

Рабочая частота магнетрона, при необходимости, может быть промодулирована любым сигналом меньшей частоты, например аудиосигналом (при помощи лампового усилителя класса-D без выходного трансформатора и фильтра). Такой сигнал может быть детектирован каким-либо LC-контуром с высокочастотным диодом на выходе (например, импульсный блок питания с подключенным к нему устройством с защитой от переплюсовки). В этом случае переданный сигнал может стать вредоносным и помешать нормальному функционированию устройства.



Модулирующее устройство на лампе ГУ-81М.

Воздействие СВЧ-излучения на полупроводниковые приборы приводит к незначительному кратковременному изменению характеристик (при излучении малой мощности) или даже выходу таковых из строя (при больших мощностях излучения) [4].

Практически все радиолампы устойчивы к СВЧ-излучению, и могут быть выведены из строя лишь при выделении тепловой мощности на внутренних элементах (например, на аноде, так как он ближе всего к стеклу), больше расчетной.

Несмотря на опасность СВЧ-излучения большой мощности, методы защиты от него довольно просты. Достаточно металлического экрана. Высокие частоты вызывают токи Фуко в металле (из-за этого нельзя использовать металлическую посуду в микроволновке) и энергия излучения уходит на нагрев металлического экрана.

Защита от помех в цепях питания осуществляется при помощи LC-фильтра.

В случае необходимости защиты человека от СВЧ-излучения используется одежда с вшитой металлической сеткой с мелкими ячейками и очки со специальным стеклом, содержащим вкрапления металла.

Заключение

На сегодняшний день, СВЧ-диапазон является, пожалуй, наиболее востребованным. Мобильная связь, беспроводной интернет, процессоры современной техники - всё работает в СВЧ-диапазоне. В быту СВЧ-излучение используется для разогрева пищи, в промышленности - для плавления металла и сушки древесины. Также, в этом диапазоне работают радиолокаторы.

Конечно, с момента открытия методов получения СВЧ-излучения, оно принесло очень много пользы, однако не стоит забывать о том, какой вред оно способно нанести.

Источник СВЧ-излучения большой мощности есть практически у каждого - это микроволновая печь. Следовательно, нужно помнить, какой вред она может нанести в случае неправильной эксплуатации (например, попыток запуска с открытой дверцей).

Нетепловое воздействие СВЧ-поля на человека не изучено, однако, при его воздействии наблюдается быстрая утомляемость и головные боли, а столь распространенная сегодня сеть Wi-fi как раз работает в этом диапазоне. Мобильные телефоны также являются источниками СВЧ-излучения (хотя мощности в данном случае исчисляются десятными долями Вт).

В современное время отказаться от техники, использующей СВЧ-диапазон, пожалуй невозможно, однако воздействие СВЧ-поля на организм человека можно минимизировать, например, отключая передачу данных на телефоне, когда нет потребности в доступе в интернет.

Если грамотно применять знания о том, какую опасность несёт СВЧ-излучение, польза от него станет ещё больше.

Список используемой литературы

1. Микроволновая печь [Электронный ресурс]: раздел "Электромагнитная безопасность" - Режим доступа: [https://ru.wikipedia.org/wiki/ микроволновая печь](https://ru.wikipedia.org/wiki/микроволновая_печь).
2. Электрофизические основы техники высоких напряжений / И.М. Бортник, И.П.Верещагин, Ю.Н. Вершинин - Москва: Энергоатомиздат, 1993.
3. Гордиенко В. А. Физические поля и безопасность жизнедеятельности - Москва: АСТ, 2006.
4. Экспериментальные исследования воздействия импульсного СВЧ-излучения на материалы / Н.С. Вернигоров, А.П. Саркисян, А.С. Сулакшин, Ю.П. Шаркеев // журнал "ИНФОРМОСТ" - 2002.- №6. - С.51.