

Миниатюрный усилительный клистрон Ку-диапазона длин

ВОЛН

Представлены результаты разработки миниатюрного импульсного усилительного клистрона для коротковолновой части сантиметрового диапазона длин волн. В полосе более 150 МГц получена мощность более 500 Вт. Приведены основные характеристики клистронного усилителя и результаты проектирования и моделирования.

Ключевые слова: усилительный клистрон, электронно-оптическая система, магнитная фокусирующая система, электродинамическая система, двухзорные резонаторы

В ЗАО "Светлана-Электронприбор" выполнена разработка миниатюрного усилительного клистрона Ку-диапазона длин волн с малым временем готовности, предназначенного для работы в качестве выходного каскада передатчика РЛС.

Сложность работы заключалась в достижении широкой полосы усиливаемых частот при сравнительно низком анодном напряжении в сочетании с малыми габаритными размерами и весом клистрона.

Основные параметры разработанного клистрона:

Полоса рабочих частот	> 150 МГц
Мощность выходного сигнала в полосе рабочих частот	600±100 Вт
Напряжение катода	< 4 кВ
Мощность питания	< 2200 Вт
Входная мощность	200±100 мВт
Скважность	>20
Время готовности после включения подогревателя в форсированном режиме	не более 20 с
Вес	не более 1 кг

Разработанный клистрон представляет собой многолучевую резонаторную конструкцию, выполненную на 5-ти двухзорных коаксиальных резонаторах, фокусировка электронного потока в которой осуществляется постоянными магнитами. Профили резонаторов в поперечном направлении прорезаны электроискровым методом, что позволило корректировать частоты резонаторов и обеспечить соосность пролетных отверстий при сборке. К резонаторному блоку с одной стороны припаян механизм настройки в виде мембраны с винтами для ее перемещения, а с другой стороны – волноводы с баночными выводами энергии.

К торцевым поверхностям резонаторной системы припаяны железные магнитные экраны. К коллекторному экрану приварен коллектор, в котором во внутренней полости сделан конус для предотвращения возврата электронов. В катодный экран вставлен керамический изолятор с электронной пушкой, который закрыт крышкой с выводами

питания. Выводы питания заканчиваются проводами для присоединения к источнику питания и залиты компаундом.

Выходная цепь клистрона представляет собой систему двух связанных резонаторов, один из которых находится в волноводе на выходе клистрона. Частотная характеристика формируется входным резонатором и тремя промежуточными резонаторами. При настройке клистрона резонаторы настраиваются таким образом, чтобы в полосе рабочих частот добиться равномерности коэффициента усиления с величиной не менее 40 дБ.

Разрез разработанного клистрона представлен на рис.1.

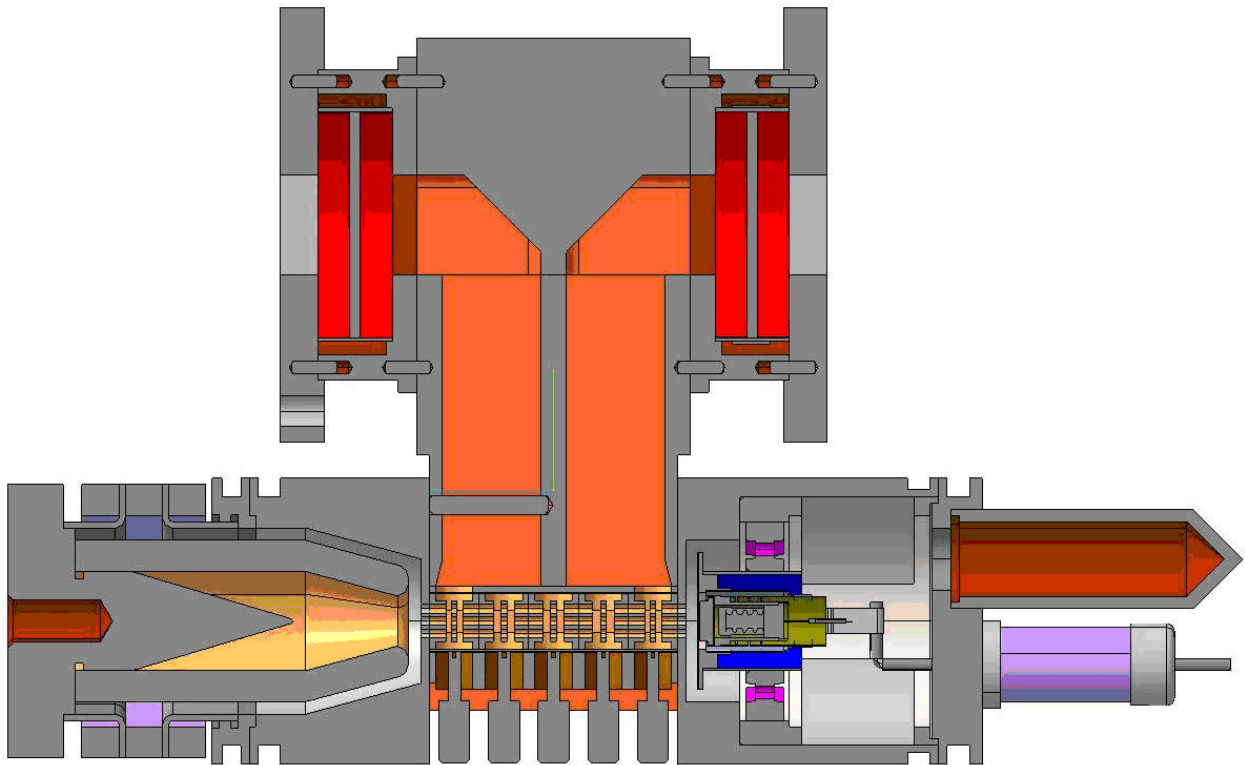


Рисунок 1

Расчет показал, что высокая эффективность взаимодействия резонаторов с электронным потоком получается при относительно (к электронной длине волны) радиусе пролётных труб, удовлетворяющем выражению $\beta_{ea}=0.7-1$ рад. При заданной длине волны сигнала и заданном напряжении питания клистрона диаметр пролётных труб выбран $2a=0.7$ мм ($\beta_{ea}=0.98$ рад – близко к верхнему пределу).

Сопротивление резонаторов равно произведению характеристического сопротивления и нагруженной добротности. Последняя для крайних резонаторов определяется нагрузкой трактами, а для средних резонаторов – связью с электронным потоком, которая может регулироваться геометрией области взаимодействия. При вышеупомянутой системе настройки добротность средних резонаторов не очень важна.

В случае применения двухзорных коаксиальных резонаторов характеристическое сопротивление при выбранных характеристиках и размерах пространства взаимодействия составляет не менее 50 Ом. Это значение обеспечивает требуемое усиление и полосу

рабочих частот, т.к. в данном случае сопротивление выходного резонатора $\rho \cdot Q_H$ равно сопротивлению электронного потока U_0 / I_0 .

При имеющейся средней мощности электронного потока возможно использование контактной системы охлаждения.

Основой клистрона является электронный поток. Отношение сопротивления электронного потока к сопротивлениям резонаторов определяет усиление, коэффициент полезного действия и полосу рабочих частот клистрона.

Одной из главных характеристик электронного потока является первеанс, который для разработанного клистрона составляет величину $I_0/U_0^{3/2} = 3.0 \text{ мкА/В}^{3/2}$. Этот первеанс слишком велик по причине неустойчивости поддержания для одиночного луча. Однако он может быть реализован электронным потоком, состоящим из нескольких лучей с меньшим первеансом каждого луча. Таким образом, электронно-оптическая система клистрона состоит из 7 лучей с первеансом по $0.43 \text{ мкА/В}^{3/2}$ при напряжении 3500 В и 7 пролетных труб для них диаметром 0.7 мм, находящихся на расстоянии 0.25 мм друг от друга. Рабочая длина потока (и электродинамической системы) составляет 20 мм.

Фокусировка электронного потока обеспечивается статическим магнитным полем, создаваемым магнитной фокусирующей системой, состоящей из магнитных блоков, изготовленных из сплава NdFeB, и деталей из мягкого железа с содержанием углерода менее 0.25%. Расчет показал, что минимальное магнитное поле, необходимое для фокусировки электронного потока (Бриллюэновское), составляет 1850 Гс. Реальное магнитное поле выбрано 2300 Гс, что доказывает оптимальность рассчитанной электронно-оптической системы.

Электронная пушка содержит плоский катод диаметром 4 мм, на расстоянии от которого примерно 0.1 мм установлена сетка толщиной 0.1 мм с отверстиями по 0.8 мм диаметром и анод (магнитный экран) с отверстиями диаметром 0.7 мм. Расчётная плотность тока катода составляет 23 А/см^2 . При имеющейся средней мощности электронного потока 2200 Вт возможно использование контактной системы охлаждения.

Расчёт магнитной системы показал её оптимальную конфигурацию при минимальной массе. На рис. 2 показано распределение магнитного поля и график распределения магнитной индукции в высокочастотном зазоре.

Проблема уменьшения времени готовности решена увеличением мощности накала в форсированном режиме и увеличением надежности работы подогревателя в этом режиме.

На рис.3 представлены частотные характеристики одного из опытных образцов разработанного клистрона.

Из приведенных графиков видно, что изменение выходной мощности в пределах заданной полосы не превышает 1 дБ и выходная мощность остается примерно постоянной при изменении входной мощности.

Эскиз внешнего вида разработанного клистрона представлен на рис.4.

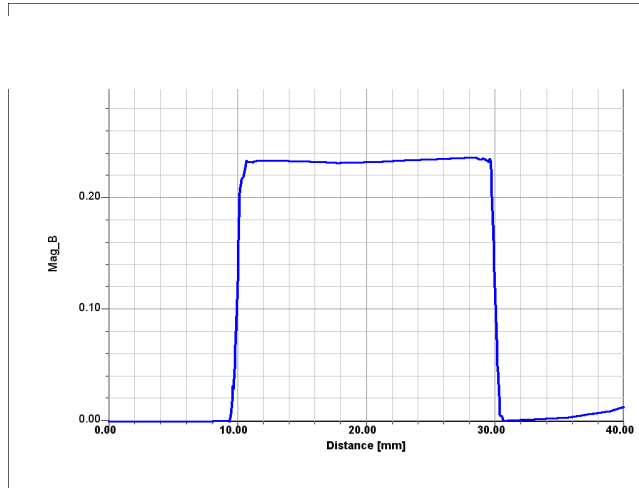
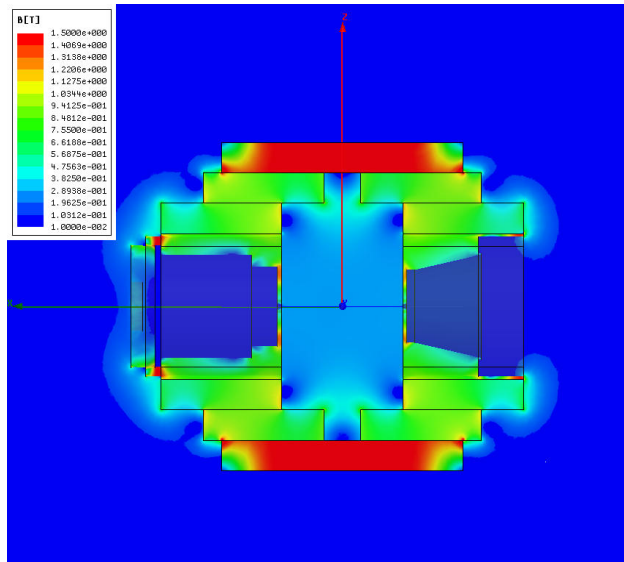


Рисунок 2

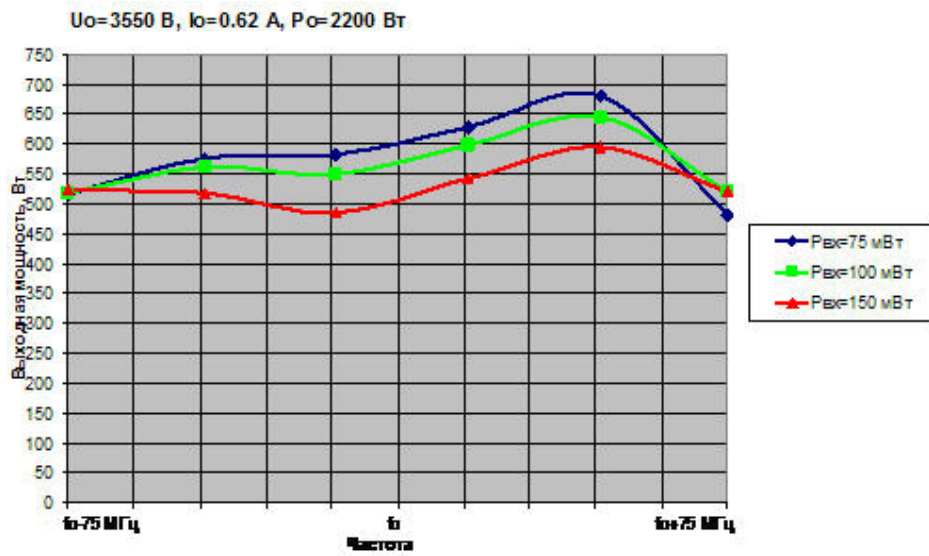


Рисунок 3

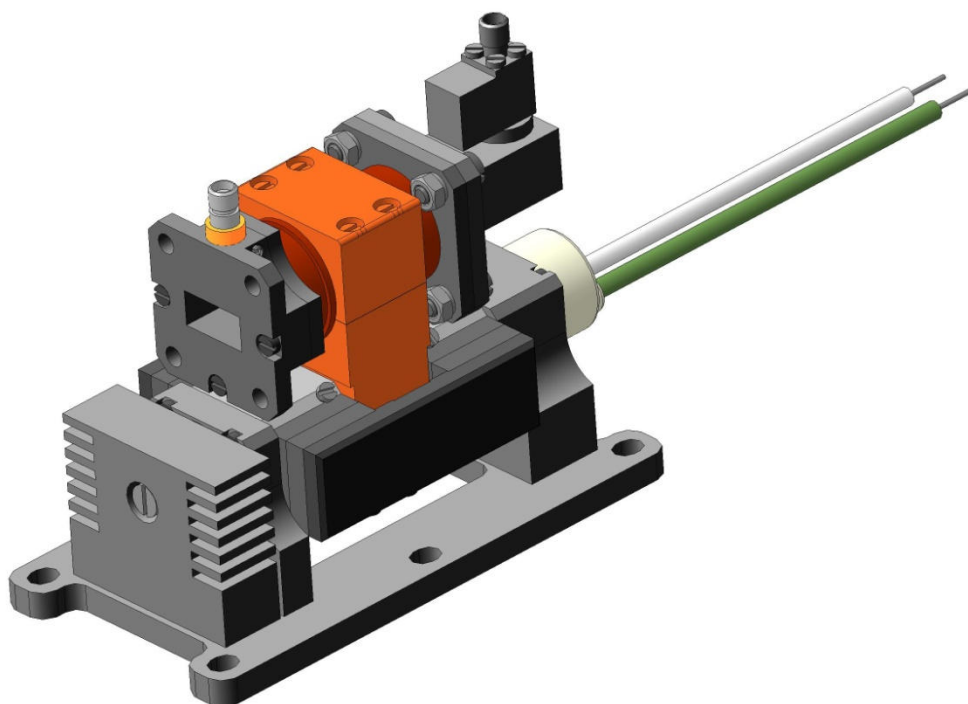


Рисунок 4

Разработанный в ЗАО «Светлана-Электронприбор» миниатюрный усилительный импульсный клистрон для коротковолновой части сантиметрового диапазона длин волн превосходит известные аналоги^{1,2} по полосе рабочих частот и по массогабаритным характеристикам.

Библиографический список

1. А.З.Хайков, Клистронные усилители, Издательство «Связь», 1974
2. K.Fujisawa, General Treatment of Klystron Resonant Cavities, IRE Transactions on Electron Devices, v.MTT-6, №4, October 1958