

# АНАЛИЗ МУЛЬТИПОЛЬНОГО СВЧ УМНОЖИТЕЛЯ С РАСПРЕДЕЛЕННЫМ ВЗАИМОДЕЙСТВИЕМ

А.А. Елизаров, Е.А. Сорокин

*Московский государственный институт электроники и математики*

E-mail:lmis@miem.edu.ru

The analysis of the microwave devices on the basis of the ring electrodynamic structures using resonant sections of slow wave systems is offered. The possibility of creation on their base the multipole multiplier of the microwave providing long interaction of an electronic beam with transversal-lengthy electromagnetic field, continuous selection of energy and is shown by high factor of transformation frequency.

Современный этап развития вакуумной электроники СВЧ связан с исследованием и разработкой приборов и устройств, обеспечивающих длительное взаимодействие пучка заряженных частиц с распределенным поперечно-протяженным электромагнитным полем и непрерывным отбором энергии. Интерес к созданию таких приборов обусловлен перспективностью разработки на этой основе новых СВЧ элементов и модулей с улучшенными выходными параметрами, которые могут быть широко применены в радиолокационных системах связи и телекоммуникаций, в ускорительной технике, электронной микроскопии и других областях [1].

Одним из перспективных направлений исследования новых приборов и устройств вакуумной СВЧ электроники и электродинамических систем, способных обеспечить эффективное поперечно-протяженное взаимодействие с непрерывным отбором энергии, являются мультипольные кольцевые структуры, использующие резонансные отрезки замедляющих систем [2].

Для обеспечения фокусировки интенсивного электронного потока с одновременной возможностью его распределенного взаимодействия с электромагнитным полем и непрерывным отбором энергии, авторами предложена мультипольная электронная линза, содержащая резонаторную систему из четырех и более отрезков замедляющих систем, соединенных последовательно через один и расположенных симметрично по окружности коаксиально проходящему внутри потоку заряженных частиц [3]. Также авторами показана возможность создания и предложена конструкция малошумящего СВЧ усилителя на основе электродинамической системы из кольцевых мультипольных электронных линз. В таком СВЧ усилителе возрастание амплитуды сигнала происходит вначале за счет поперечного параметрического взаимодействия, а затем продольного взаимодействия, основанного на замедлении электронов, сходного с процессом усиления в лампе с бегущей волной (ЛБВ) [4].

Дальнейшее усовершенствование конструкции рассмотренного выше малошумящего мультипольного усилителя СВЧ позволило предложить на его основе высокоэффективный мультипольный умножитель СВЧ с длительным взаимодействием широкого пучка заряженных частиц с

поперечно-протяженным электромагнитным полем, непрерывным отбором энергии и высоким коэффициентом преобразования частоты.

Проведенный анализ усиления показал, что непосредственное использование мультипольного усилителя СВЧ в качестве множителя неэффективно ввиду использования малых величин входного сигнала и наведенного им поля во входном резонаторе. Увеличение мощности входного сигнала приводит к переходу усилителя в нелинейный режим и его самовозбуждению.

Аналогами предлагаемого мультипольного множителя СВЧ являются умножители частоты на основе двухрезонаторных клистронов. Возможность эффективного умножения частоты в таких приборах обусловлена наличием большого числа высших гармоник тока в выходном резонаторе. Недостатком таких умножителей является низкий электронный к.п.д. преобразования (единицы процентов), поскольку по мере увеличения кратности умножения частоты, т.е. с ростом номера гармоники, сужается интервал приемлемых значений параметра группирования электронов [5].

Конструкция мультипольного множителя СВЧ (рис.1) содержит экранированную от магнитного поля электронную пушку 1, входной резонатор 2, соединенный с источником сигнала 3, выходной резонатор 4, соединенный с нагрузкой 5, и коллектор 6.

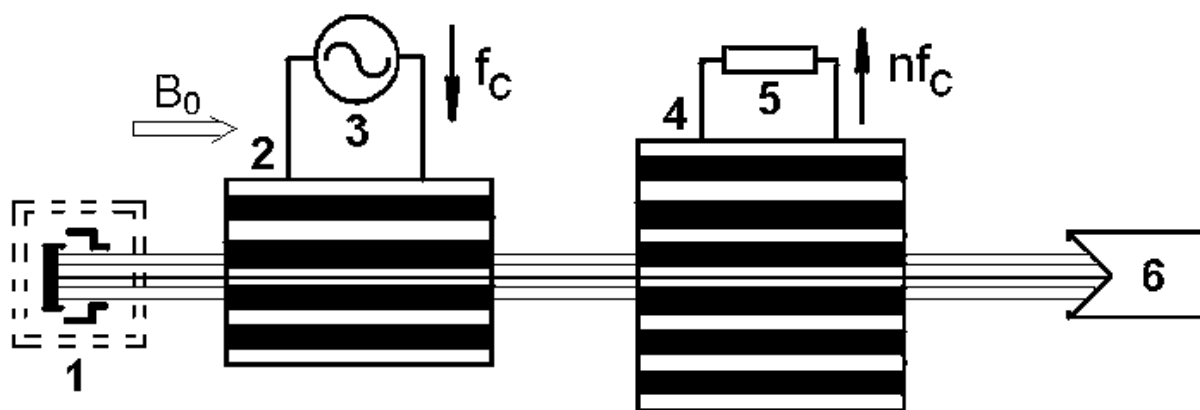


Рис.1. Конструкция мультипольного СВЧ умножителя:  
1 – электронная пушка, 2 – входной резонатор, 3 – источник сигнала,  
4 – выходной резонатор, 5 – нагрузка, 6 – коллектор.

Оба резонатора умножителя представляют собой СВЧ мультипольные электронные линзы, выполненные в виде резонансных отрезков замедляющих систем - круглых металлических стержней с симметрично расположенными продольными канавками, ширина которых равна их глубине и равна четверти замедленной длины волны. Необходимо отметить также, что число пар электродов выходного резонатора выполняется равным кратности умножения частоты источника сигнала.

На рис. 2 и 3 изображены поперечные сечения входного резонатора, представляющего собой квадрупольную линзу и выходного резонатора, выполненного в виде октуполя.

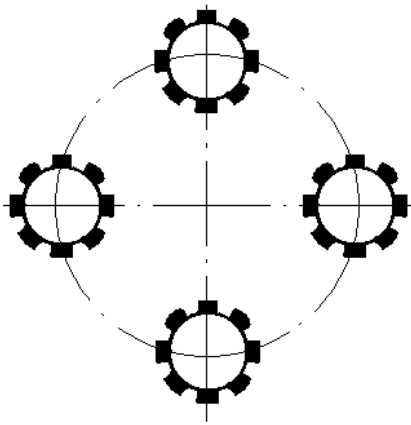


Рис.2. Поперечное сечение входного резонатора.

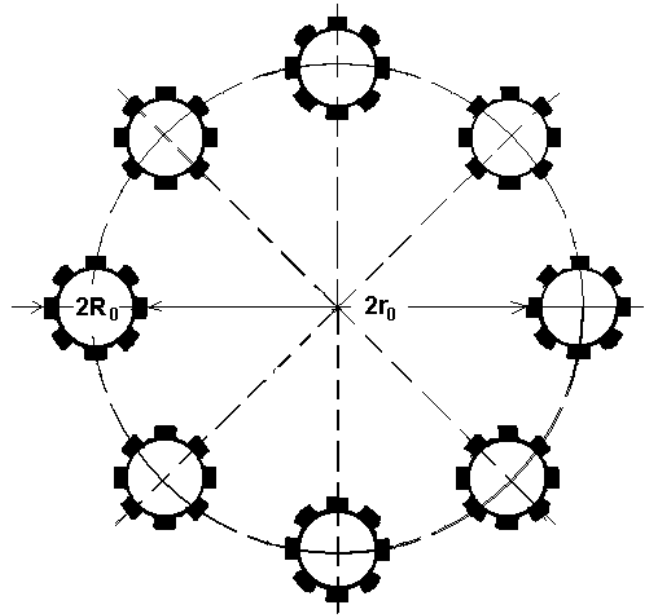


Рис.3. Поперечное сечение выходного резонатора.

На рис.4 показано статическое распределение потенциала в октупольной линзе при подаче на ее электроды постоянных напряжений  $\pm V$ , рассчитанное

по формулам: 
$$\Phi(r, \varphi) = \frac{\pm V}{\ln C_0} \operatorname{Arth} \frac{2(1 + \frac{2(R_0 \pm h)}{r_0})^2 (\frac{r}{r_0})^4 \cos 4\varphi}{(1 + \frac{2(R_0 \pm h)}{r_0})^4 + (\frac{r}{r_0})^8},$$

где  $C_0 = 1 + \frac{r_0^2}{2(R_0 \pm h)(r_0 + (R_0 \pm h))}$ ,  $2R_0$  – внешний диаметр металлического стержня,  $h$  – глубина канавок металлического стержня,  $2r_0$  – внутренний диаметр резонаторной системы.

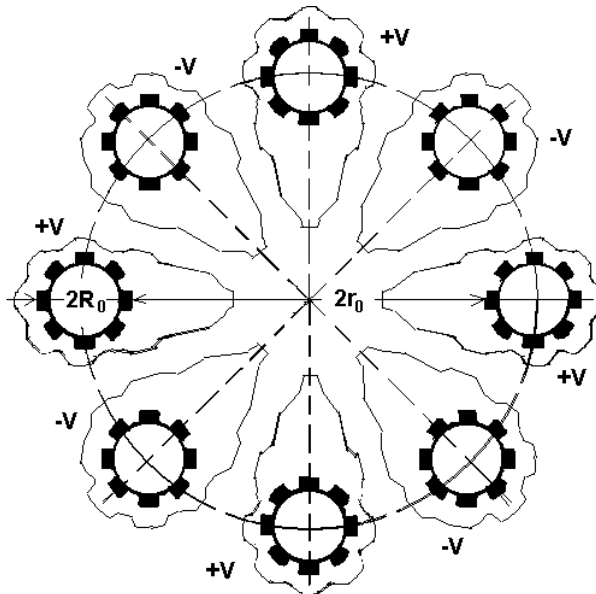


Рис.4. Статическое распределение потенциала в поперечном сечении линзы-октуполя.

Работа мультипольного умножителя СВЧ в режиме, например, четырехкратного увеличения частоты, осуществляется следующим образом. Экранированная от магнитного поля электронная пушка 1 создает поток электронов, который попадая в магнитное поле с индукцией  $B_0$ , возбуждается во входном квадрупольном резонаторе 2 с помощью источника сигнала 3 на быстрой циклотронной волне с частотой  $f$ , приближенно равной частоте сигнала  $f_c$ . Октупольный выходной резонатор, настроенный на частоту  $4f_c$ , соединяется с нагрузкой 5. Возбужденный поток электронов наводит в октуполе электрическое поле. Согласно правилу Ленца, это поле направлено таким образом, что электроны потока тормозятся и отдают полю свою энергию. Электроны вращаются в неблагоприятной фазе, причем за время одного оборота  $1/f_c$  наведенное поле четырежды меняет свой знак, то есть имеет частоту  $4f_c$ . Мощность, поступающая в нагрузку 5, обусловлена соответствующим уменьшением радиуса вращения электронного пучка. Необходимо отметить, что входная мощность частоты  $f$  имеет значительно большую величину по сравнению с прототипом - мультипольным усилителем СВЧ, что и обеспечивает высокоэффективное умножение частоты.

При использовании мультипольных структур с числом электродов  $2n$ , можно аналогично осуществить умножение частоты в  $n$  раз. Так, используя выходной резонатор с десятью электродами, можно получить частоту  $5f_c$ .

Эффективность работы умножителя характеризуется теоретическим анализом потерь преобразования частоты. Потери преобразования определяются по формуле  $L_{np} = 10 \lg(1/K_{np})$ , где  $K_{np} = P_{вых\_n} / P_{вх}$  - коэффициент преобразования входного  $P_{вх}$  ( $n=1$ ) сигнала в выходной  $P_{вых\_n}$  сигнал  $n$ -кратной частоты. Чем меньше потери преобразования, тем выше коэффициент преобразования и качество умножителя. В предлагаемом мультипольном умножителе СВЧ при малых значениях  $n$  ( $n < 10$ ) процесс умножения частоты сопровождается некоторым усилением входного сигнала. В этом случае потери преобразования отрицательны, а коэффициент преобразования больше единицы  $P_{вых\_n} > P_{вх}$ . При этом к.п.д. преобразования частоты, определяемый по формуле  $\eta = P_{вых\_n} / (P_0 + P_{вх})$ , где  $P_0$  - мощность электронного потока, составит десятки процентов.

1. Генераторы и усилители СВЧ / под ред. И.В.Лебедева. М.: Радиотехника, 2005.
2. А.А.Елизаров, Е.А.Сорокин. Мультипольные электронные линзы на отрезках замедляющих систем и устройства на их основе // Труды IX Межвузовской научной школы «Концентрированные потоки энергии в космической технике, электронике, экологии и медицине». М.: НИИЯФ МГУ, 2008.- С.87-91.
3. Патент РФ на изобретение № 2 356 123. Сверхвысокочастотная мультипольная линза / А.А.Елизаров, Е.А.Сорокин. Бюл. «Открытия, изобретения» № 14, 2009.
4. Патент РФ на изобретение № 2 356 124. Малошумящий мультипольный усилитель СВЧ / А.А.Елизаров, Е.А.Сорокин. Бюл. «Открытия, изобретения» № 14, 2009.
5. Электронные приборы СВЧ: Учебное пособие для вузов/В.М.Березин, В.С.Буряк, Э.М.Гутцайт, В.П.Марин М.: Высшая школа, 1985.