

МУЛЬТИПОЛЬНЫЕ ЭЛЕКТРОННЫЕ ЛИНЗЫ НА ОТРЕЗКАХ ЗАМЕДЛЯЮЩИХ СИСТЕМ И СВЧ УСТРОЙСТВА НА ИХ ОСНОВЕ

А.А. Елизаров, Е.А. Сорокин

Московский государственный институт электроники и математики

E-mail: lmis@miem.edu.ru

The design an multipole electronic lens on the basis of the ring structure using resonant sections of slow wave systems is offered. The possibility of creation on this basis the microwave low noise amplifier of the providing long interaction of an electronic bunch with transversal-lengthy electromagnetic field and continuous selection of energy is shown.

Одним из перспективных направлений развития современной вакуумной СВЧ-электроники является создание приборов и устройств, обеспечивающих длительное взаимодействие пучка заряженных частиц с распределенным поперечно-протяженным электромагнитным полем и непрерывным отбором энергии. Интерес к исследованию таких приборов объясняется возможностью разработки новых генераторов и усилителей СВЧ с улучшенными выходными параметрами, которые могут быть широко применены в радиолокационных комплексах связи и телекоммуникаций, в ускорительной технике, электронной микроскопии и других областях [1].

Однако создание таких приборов и устройств требует исследования и разработки новых электродинамических систем, способных обеспечивать эффективное поперечно-протяженное взаимодействие и непрерывный отбор энергии. Наиболее перспективными с этой точки зрения являются двумерно-периодические волноведущие системы, а также мультипольные кольцевые структуры, использующие резонансные отрезки одномерных замедляющих систем.

При разработке электронно-лучевых приборов широко используются иммерсионные и одиночные электростатические линзы, состоящие из двух или трех цилиндрических электродов с различными значениями постоянного потенциала, внутри которых проходит электронный поток [2]. Также известны квадрупольные и мультипольные электростатические линзы, содержащие кольцевую систему идентичных электродов с гиперболическими поверхностями, на которые подаются постоянные и чередующиеся по значению положительные и отрицательные потенциалы. [3]. Такие линзы применяются для фокусировки или ускорения пучков заряженных частиц с малым значением первеанса, а также для коррекции аберраций.

Для обеспечения фокусировки интенсивного электронного потока с одновременной возможностью его длительного взаимодействия с поперечно-протяженным электромагнитным полем и непрерывным отбором энергии, предложена мультипольная электронная линза, содержащая резонаторную систему из четырех и более электродов, соединенных последовательно через один и расположенных симметрично по окружности коаксиально проходящему

внутри потока заряженных частиц. Электроды резонаторной системы линзы выполнены в виде резонансных отрезков круглых металлических стержней с не менее чем шестью симметрично расположенными продольными канавками, ширина которых равна их глубине и равна четверти замедленной длины волны.

На рис.1 в качестве примера представлена изометрия линзы-октуполя, состоящей из восьми электродов.

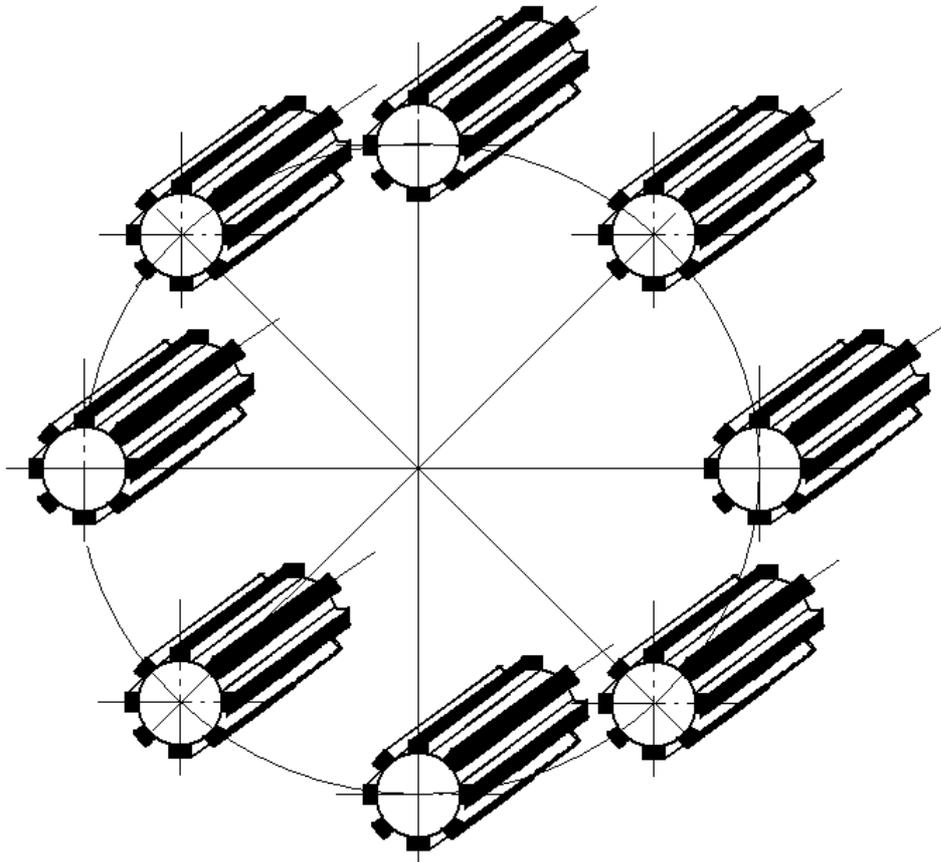


Рис.1. Электронная линза – октуполь.

На рис.2 дано статическое распределение потенциала в такой линзе при подаче на ее электроды постоянных напряжений $\pm V$, рассчитанное по

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

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

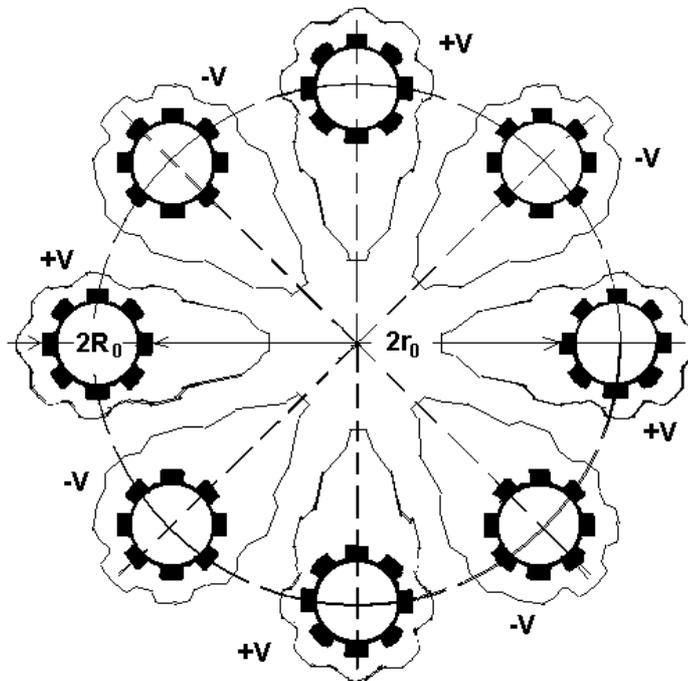


Рис.2. Статическое распределение потенциала в поперечном сечении линзы-октуполя.

Возможность обеспечения длительного взаимодействия пучка заряженных частиц с поперечно-протяженным электромагнитным полем и непрерывным отбором энергии позволяет создать на основе такой мультипольной линзы малошумящий СВЧ усилитель.

Известен параметрический усилитель (лампа) Р.Адлера, в котором в качестве входной и выходной секций применены резонаторы, через которые движется поток электронов, фокусируемый однородным магнитным полем. Напряженность поля выбрана так, что циклотронная частота равна частоте сигнала. Параметрическое усиление происходит в квадрупольной системе электродов, создающей поперечное поле, к которой приложен сигнал накачки, изменяющийся с удвоенной циклотронной частотой. В таком усилителе периодически меняющимся параметром является кинетическая энергия электронов, движущихся по спиральной траектории [4]. Недостатком такого усилителя является невозможность осуществления одновременно и протяженного взаимодействия электронного пучка с полем квадрупольной секции, что в итоге не обеспечивает длительного взаимодействия.

Прототипом предлагаемого СВЧ прибора является конструкция параметрического усилителя, выполненного в виде лампы бегущей волны (ЛБВ) с двумя спиральными замедляющими системами. Первая спираль служит для модуляции электронного пучка на частоте накачки, вторая спираль – для ввода и съема сигнала основной и комбинационных частот. Такой усилитель, в отличие от обычной ЛБВ, может работать как на медленных, так и на быстрых волнах пространственного заряда, используемых в качестве накачки [5]. К недостаткам усилителя следует отнести повышенный уровень шумов, вызванный продольным взаимодействием электронного пучка с полем замедляющих систем, вследствие преобразования быстрых волн высших

комбинационных частот в волну частоты сигнала. Кроме того, параметрическая ЛБВ работает лишь с узким параксиальным пучком электронов и является лампой малой или средней мощности.

Предлагаемая конструкция малошумящего мультипольного СВЧ усилителя (рис.3) содержит экранированную от магнитного поля электронную пушку 1, входной резонатор 2, соединенный с поглощающей нагрузкой 3, резонатор накачки 4, соединенный с источником накачки 5 и содержащий дипольную секцию, электроды которой соединены с поглощающей нагрузкой 6, резонатор усиления 7, соединенный через циркулятор 8 с источником сигнала 9 и нагрузкой 10, коллектор 11.

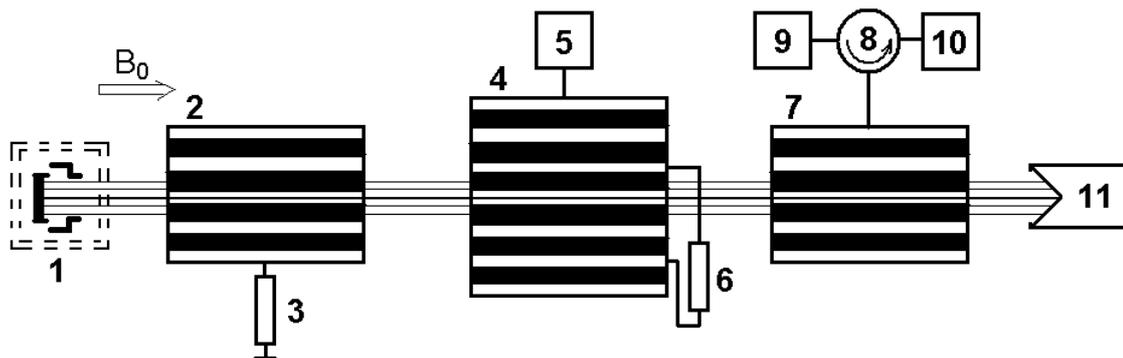


Рис.3. Конструкция мультипольного СВЧ усилителя: 1 – электронная пушка, 2 – входной резонатор, 3 – поглощающая нагрузка, 4 – резонатор накачки, 5 – источник накачки, 6 – поглощающая нагрузка, 7 – резонатор усиления, 8 – циркулятор, 9 – источник сигнала, 10 – нагрузка, 11 – коллектор.

Все резонаторы усилителя представляют собой сверхвысокочастотные мультипольные электронные линзы, выполненные в виде резонансных отрезков замедляющих систем. На рис. 4 и 5 изображены поперечные сечения резонатора накачки, выполненного в виде октуполя, и резонатора усиления, представляющего собой квадрупольную линзу.

Работа малошумящего мультипольного СВЧ усилителя осуществляется следующим образом. Экранированная от магнитного поля электронная пушка 1 создает пучок электронов, который попадая в магнитное поле с индукцией B_0 , начинает вращаться с частотой ω_r , равной половине циклотронной частоты $\omega_c = \frac{|e|\hbar}{m} B_0$, где $\frac{|e|\hbar}{m} = \eta$ - отношение заряда к массе электрона. Во входном резонаторе 2 шум быстрой циклотронной волны на частоте ω_i удаляется из электронного пучка и поглощается нагрузкой 3. Далее на частоте сигнала ω_s в эту волну переходит шум медленной синхронной волны, вследствие параметрической связи указанных волн в резонаторе накачки 4. Резонатор накачки 4, содержащий большее число электродов, а, значит, имеющий больший коэффициент замедления, запитывается от источника 5 с частотой ω_n . Дипольная секция, входящая в состав резонатора накачки 4, соединенная с поглощающей нагрузкой 6, позволяет устранить неточности соосности усилителя, допущенные при технологической сборке, которые приводят к появлению холостой быстрой циклотронной волны и насыщению

коэффициента усиления. Далее в резонатор усиления 7 через циркулятор 8 в электронный поток на очищенной от шума медленной синхронной волне вводится сигнал с частотой ω_s от источника 9. Процесс усиления в резонаторе 7 не является параметрическим – он основан на фазовом синхронизме электронного потока с полем структуры и аналогичен усилению в обычной ЛБВ. Усиленный сигнал через циркулятор 8 поступает в нагрузку 10.

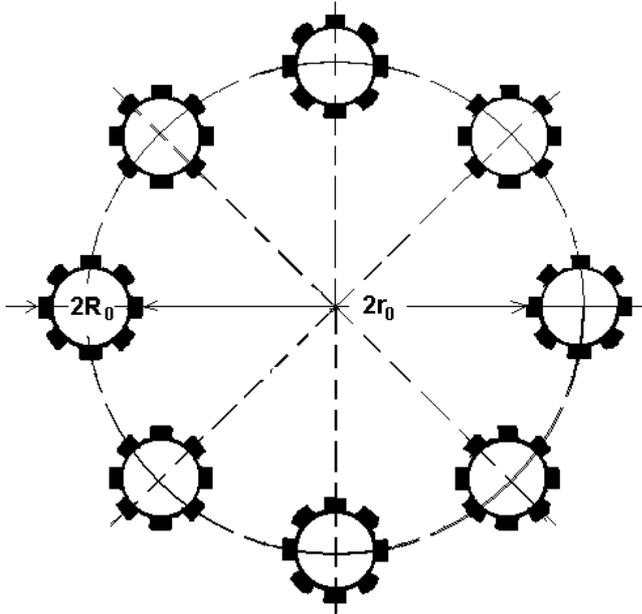


Рис.4. Поперечное сечение резонатора накачки.

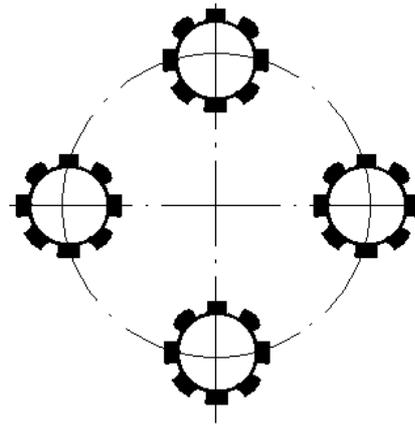


Рис.5. Поперечное сечение резонатора усиления.

Усиление сигнала происходит в резонаторе накачки при выполнении условия активной связи быстрой и медленной синхронных волн, когда $\omega_n = 0; \beta_n = 0$, где β_n - постоянная распространения волны накачки. При этом постоянные распространения поперечных волн электронного потока, вращающегося с частотой ω_r , определяются формулой $\beta_i^r = \beta_i - (\xi - 1) \frac{\omega_r}{u_0}$, где $i = 1, 2, 3, 4$ – номера нормальных поперечных волн электронного пучка, ξ - число пар электродов мультипольной линзы, u_0 - средняя скорость электронного потока. Кроме этого, наряду с поперечным параметрическим усилением, возрастание амплитуды сигнала происходит за счет продольного взаимодействия, основанного на замедлении электронов, сходного с процессом усиления в ЛБВ.

1. Генераторы и усилители СВЧ / под ред. И.В.Лебедева. М.: Радиотехника, 2005.
2. А.А. Жигарев. Электронно-лучевые приборы. М.-Л: Энергия, 1965.
3. М. Силадьи. Электронная и ионная оптика. М.: Мир, 1990.
4. А.А.Елизаров, Е.А.Сорокин. Компьютерное моделирование траекторий электронов в квадрупольной секции СВЧ усилителя на лампе Адлера // Труды VIII Межвуз. научн. школы «Концентрированные потоки энергии в космической технике, электронике, экологии и медицине». М.: НИИЯФ МГУ, 2007.с.32-36.
5. В.М.Лопухин, В.Б.Магалинский, В.П. Мартынов, А.С. Рoshаль. Шумы и параметрические явления в электронных приборах СВЧ. М.: Наука, 1966.