

Тороидальный резонатор с электростатической фокусировкой

© Т.Д. Дауменов, М.А. Хизирова

Алматинский университет энергетики и связи,
050000 Алматы, Казахстан
e-mail: dautl@mail.ru

(Поступило в Редакцию 9 апреля 2017 г. В окончательной редакции 5 сентября 2018 г.)

Рассмотрен вопрос о возможности использования одиночной линзы, встроенной в области сосредоточения электрического поля резонатора, для модуляции электронного потока по скорости. Показано, что применение одиночной линзы в качестве модулятора по скорости не влияет на величину коэффициента взаимодействия электронного потока с полем линзы.

DOI: 10.21883/JTF.2019.03.47182.2292

Введение

В электронике СВЧ для расчета и создания мощных усилителей и генераторов большое внимание уделяют формированию мощного электронного потока различной конфигурации и его транспортировке на значительные расстояния. Теории формирования электронных пучков большой интенсивности посвящен ряд исследований [1–3]. Известны способы транспортировки электронных потоков в приборах СВЧ с клистронным механизмом взаимодействия между входным и выходным резонаторами посредством различных статических электрических и магнитных полей [4]. Необходимость применения указанных полей обусловлена влиянием объемных зарядов и кулоновских сил расталкивания пространственного заряда на траекторию движения электронов. Как правило, фокусирующие действия электрических и магнитных полей осуществляются в дрейфовом пространстве СВЧ-приборов. В работе [5] показана возможность использования одиночной линзы для осуществления фокусировки потока электронов в вертикальном направлении в прямопролетном клистроне. Эта задача решена в первом приближении путем решения дифференциального уравнения для траектории электронов, движущихся в электростатическом поле с вращательной симметрией. Показано также, что длина дрейфового пространства L должна равняться фокусному расстоянию одиночной линзы.

Выражение для коэффициента взаимодействия потока электронов с СВЧ-полем одиночной линзы

Рассмотрим трехэлектродную одиночную линзу, электроды которой состоят из трех плоских соосных диафрагм, расположенных на равном расстоянии s друг от друга, параллельных между собой (рис. 1).

Осевое распределение электростатического потенциала $\Phi(z)$ представим в виде [6–8]

$$\Phi(z) = \Phi_0 \left(1 - \frac{\chi^2}{1 + \left(\frac{z-s}{d}\right)^2} \right), \quad (1)$$

где Φ_0 — потенциал свободного пространства, χ^2 — параметр, изменяющийся в пределах $0 < \chi^2 < 1$, d — диаметр отверстий диафрагм. Начало координат совместим с плоскостью среднего электрода, а ось z является осью симметрии системы. Пусть на крайние электроды одиночной линзы подается переменное напряжение с частотой ω и амплитудой U_m

$$u = U_m \sin \omega t. \quad (2)$$

Обозначим через t_0 момент прохождения некоторого электрона через центр среднего электрода линзы. Тогда, пренебрегая малым изменением скорости электрона внутри линзы, можно написать

$$t = t_0 + \frac{z}{v_0}. \quad (3)$$

Полная кинетическая энергия электрона, вошедшего в линзу с начальной скоростью

$$v_0 = \sqrt{\frac{2e\Phi_0}{m}}, \quad (4)$$

на выходе из линзы имеет величину

$$W = e\Phi_0 + \Delta W, \quad (5)$$

где приращение кинетической энергии ΔW может быть представлено в следующем виде:

$$\Delta W = \frac{eU_m}{2s} \left[\int_{-s}^s \sin \left(\omega t_0 + \frac{\omega z}{v_0} \right) dz + \frac{2s}{\Phi_0} \int_{-s}^s \Phi'(z) \sin \left(\omega t_0 - \frac{\omega z}{v_0} \right) dz \right]. \quad (6)$$

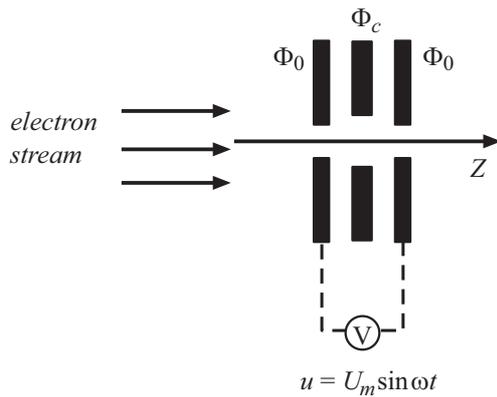


Рис. 1. Трехэлектродная одиночная линза. Переменное напряжение подается к крайним электродам.

Штрихи обозначают дифференцирование по координате z . После интегрирования приращение кинетической энергии может быть представлено в виде

$$\Delta W = eU_m \left[M - \frac{\omega}{v_0} \chi^2 I_1(z) \right] \sin \Omega t_0 + \chi^2 \left[-\sin \frac{\theta}{2} + \frac{\omega}{v_0} \chi^2 I_2(z) \right] \cos \omega t_0. \quad (7)$$

Здесь введены следующие обозначения:

$$I_1(z) = \int_{-s}^s f(z) \sin \frac{\omega z}{v_0} dz, \quad (8)$$

$$I_2(z) = \int_{-s}^s f(z) \cos \frac{\omega z}{v_0} dz, \quad (9)$$

$$f(z) = \left[1 + \left(\frac{z}{d} \right)^2 \right]^{-1}. \quad (10)$$

Величина $\theta = \frac{2\omega s}{v_0}$ характеризует невозмущенный угол пролета электронов через линзу, а через M обозначен коэффициент взаимодействия электронного потока с переменным полем одиночной линзы

$$M = \frac{\sin(\theta/2)}{(\theta/2)}. \quad (11)$$

Проведенные расчеты показывают, что интеграл $I_1(z)$ обращается в нуль, т.е. применение одиночной линзы в качестве модулятора по скорости не влияет на величину коэффициента взаимодействия электронного потока с полем линзы. Во-вторых, ввиду малости половины невозмущенного угла пролета при выполнении условия

$$s = \int_{-s}^s f(z) \cos \frac{\omega z}{v_0} dz, \quad (12)$$

сохраняется синусоидальный закон изменения приращения кинетической энергии

$$\Delta W = eMU_m \sin \omega t_0. \quad (13)$$

Тогда с учетом малости амплитуды переменного напряжения ($U_m < \Phi_0$) по сравнению с потенциалами на крайних электродах одиночной линзы скорость электрона v на выходе из линзы может быть представлена следующим образом:

$$v \approx v_0 \left(1 + \frac{MU_m}{2\Phi_0} \sin \omega t_0 \right). \quad (14)$$

Таким образом, применение одиночной линзы в качестве модулятора электронного потока по скорости практически не меняет величину коэффициента взаимодействия электронного потока с полем линзы, однако наличие среднего электрода с потенциалом Φ_c дает возможность организовать объемную фокусировку электронного потока в вертикальном направлении.

Недостатки входного резонатора клистрона классической схемы

В объемном резонаторе роль сосредоточенной емкости играет плоский зазор в виде плоскопараллельных сеток в центре резонатора, роль сосредоточенной индуктивности — тороидальная поверхность. В СВЧ-приборах с клистронным механизмом взаимодействия в качестве входных и выходных устройств используются объемные резонаторы. Емкость входного резонатора находится под высоким положительным потенциалом, там же сосредоточено преимущественно электрическое высокочастотное поле. Под действием этого высокочастотного поля электронный поток модулируется по скорости, в дальнейшем переходя в модуляцию по плотности в дрейфовом пространстве СВЧ-прибора, а в выходном резонаторе снимают энергию модулированного электронного потока при вхождении в выходной резонатор в тормозящем режиме электрического поля.

Недостатками описанного выше входного резонатора является, во-первых, наличие сеток, являющихся механической преградой на пути потока электронов, во-вторых, провисания эквипотенциальных поверхностей вблизи сеток, оказывающие рассеивающее действие на электроны. Эти факторы снижают величину конвекционного тока и тем самым понижают мощность СВЧ-прибора. Поэтому в традиционных схемах таких СВЧ-приборов возникает необходимость использования различных транспортирующих систем в дрейфовом пространстве: системы однородного или неоднородного магнитного поля, системы однородного или неоднородного электрического поля.

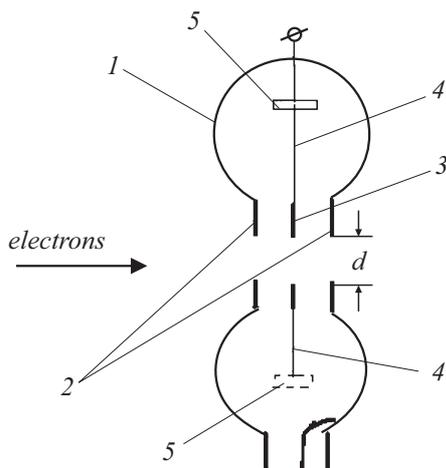


Рис. 2. Тороидальный резонатор с электростатической фокусировкой. Пояснения — в тексте.

Преимущества предлагаемой схемы входного резонатора

Положительный результат достигается тем, что вместо емкости, состоящей из двух параллельных сеток, где сосредоточено сверхвысокочастотное электрическое поле, используется одиночная линза, состоящая из трех диафрагм.

На рис. 2 представлена конструкция предлагаемого устройства [6]. Данное устройство представляет собой тороидальный резонатор *I*, в котором в области сосредоточения высокочастотного электрического поля установлена одиночная линза, состоящая из трех диафрагм с круглыми отверстиями равного диаметра, крайние электроды которой *2* находятся под одинаковым высоким ускоряющим потенциалом; на эти же электроды подается высокочастотное электрическое поле. Средняя диафрагма *3* устанавливается с помощью тонких проводящих нитей *4*, пропущенных через прорези *5*, параллельные линиям тока, расположенные на противоположных поверхностях тороида; на нее подается потенциал, отличающийся от потенциалов, поданных на крайние диафрагмы.

Совокупность трех диафрагм — это одиночная линза, фокусное расстояние которой регулируется потенциалом средней Φ_c диафрагмы.

Внешние электроды одиночной линзы находятся при потенциале Φ_0 , равном потенциалу окружающего линзу пространства, а потенциал Φ на внутреннем электроде может быть больше или меньше потенциала внешних электродов. Одиночная линза во всех случаях будет собирающей линзой [9]. Мы предполагаем, что $\Phi_c > \Phi_0$. Такой резонатор имеет возможность осуществлять вертикальную фокусировку электронного потока в приборах СВЧ с клистронным механизмом взаимодействия [6,8].

Заключение

Таким образом, тороидальный резонатор предлагаемой конструкции может выполнять одновременно роль модулятора электронов по скорости, с одной стороны, и транспортирующей системы в дрейфовом пространстве, с другой, и поток сгустков электронов может быть сфокусирован на поверхности входного окна выходного резонатора. Такой резонатор с электростатической фокусировкой способствует повышению мощности СВЧ-приборов клистронного типа за счет увеличения конвекционного тока.

Список литературы

- [1] *Sushkov A.D., Molokovsky S.L.* Investigation of electron guns with electron beam current control. 3-Czechosl. Conf. on electronics and vacuum. Phys. Transactions. Prague., 1967. P. 577–588.
- [2] *Овчаров В.Т.* // РЭ. 1968. № 8. С. 1367–1378.
- [3] *Кормилицин Б.Т., Овчаров В.Т.* // РЭ. 1960. № 7. С. 1112–1117.
- [4] *Молоковский С.И., Сушков А.Д.* Интенсивные электронные и ионные пучки. М. 1991. 304 с.
- [5] *Дауменов Т., Хизирова М.А.* // Изв. вузов. Физика. 2016. Т. 5. № 1. С. 16–19.
- [6] Патент РК № 23239. *Дауменов Т.* Тороидальный резонатор с электростатической фокусировкой.
- [7] *Дауменов Т.* // Uzbek J. Physics. 2009. Т. 11. № 1. С. 47–51.
- [8] *Дауменов Т.* // Тезисы доклада к девятому всероссийскому семинару „Проблемы теоретической и прикладной электронной и ионной оптики“. М. 2009. 62 с.
- [9] *Кельман В.М., Явор С.Я.* Электронная оптика. Л.: Наука, 1968. 488 с.