

Теоретическое исследование путей увеличения выходной мощности многолучевого микроволнового генератора монотронного типа K -диапазона, выполненного на основе трехззорного сплит-резонатора с неоднородным полем

© В.А. Царев, В.Ю. Мучкаев

Саратовский государственный технический университет им. Ю.А. Гагарина,
410054 Саратов, Россия
e-mail: muchkaev_vadim@mail.ru

(Поступило в Редакцию 29 января 2015 г.)

Представлены результаты численного трехмерного моделирования низковольтного миниатюрного многолучевого генератора монотронного типа, работающего в K -диапазоне длин волн. Принцип работы этого прибора основан на автогенерации электромагнитных колебаний при взаимодействии многолучевого электронного потока с неоднородным высокочастотным электрическим полем π -вида в трехззорном „split“-резонаторе, имеющем различные по амплитуде ВЧ-напряжения на зазорах. Представленные результаты показывают возможность получения на частоте 18.56 GHz мощности микроволнового излучения свыше 1 kW при ускоряющем напряжении 2.7 kV и полным КПД около 40%.

Источники микроволновой энергии, работающие в K -диапазоне частот (18–26.5 GHz), в последние годы все чаще используются в различных областях науки и техники, например в радиолокации, системах спутниковой связи, ускорительной технике, в установках диэлектрического нагрева для изготовления наноматериалов и т.д. [1,2].

Тем не менее применяемые традиционные генераторы СВЧ-излучения (клистроны, магнетроны и гиротроны) в K -диапазоне частот имеют либо довольно низкую выходную мощность (у магнетрона на частоте 24 GHz она обычно не превышает 0.2 kW), либо плохие массогабаритные характеристики (клистрон и гиротрон) [3], что препятствует более широкому применению данных приборов. Альтернативой мог бы стать клистрон распределенного взаимодействия (КРВ) [4]. Он имеет наилучшее отношение выходной мощности к массе при довольно высоком значении электронного КПД ($\sim 30\%$). Но его существенным недостатком является высокое ускоряющее напряжение.

Примерно 20 лет назад была предложена схема микроволнового монотронного генератора, в основе которого лежат времяпролетные эффекты, возникающие при пропускании несгруппированного интенсивного электронного потока через „split“-резонатор [5,6]. Обычно „split“-резонатор представляет собой систему двух резонаторов с высокочастотными зазорами, разделенных проводящей диафрагмой, в которой имеется щель связи. В этой системе связанных резонаторов формируются синфазные (0 -вид) и противофазные (π -вид) типы колебаний, частоты которых отличаются на малую величину, определяемую электромагнитной связью резонаторов. Так как рабочим видом является противофазный вид колебаний, то монотрон со „split“-резонатором в отличие от классических одноззорных монотронов имеет отри-

цательную электронную проводимость при относительно небольших углах пролета, определяющих длину резонатора. Эта особенность монотронов со „split“-резонатором позволяет создавать мощные микроволновые автогенераторы с малыми продольными размерами.

При специально подобранной (нарастающей по направлению к коллектору) функции распределения напряженности продольного ВЧ-электрического поля в пространстве взаимодействия полого электронного пучка с полем „split“-резонатора электронный КПД прибора может достигать 40% [7]. В работе [8] теоретически и экспериментально доказана возможность получения на частоте 18 GHz в 19-лучевом монотроне с двухззорным „split“-резонатором (при оптимальной, нарастающей по направлению к коллектору амплитуде ВЧ-поля) электронного КПД около 45% при выходной мощности около 0.6 kW. Для дальнейшего улучшения выходных параметров монотрона необходимо увеличивать число зазоров [9]. Следует отметить, что до настоящего времени не изучена возможность создания в коротковолновой части микроволнового диапазона малогабаритных многолучевых монотронов с высоким КПД (больше 30%) и большим уровнем выходной мощности (больше 500 W).

Настоящая работа посвящена изложению результатов численного трехмерного моделирования многолучевого монотрона K -диапазона частот с трехззорным „split“-резонатором.

Электродинамическая система монотрона показана на рис. 1, *a*. Она состоит из трех электромагнитно связанных через две щели связи 3 и 4 призматических резонаторов 5, 6 и 7. Два последних резонатора нагружены на волноводный вывод энергии 1. Вакуумную герметизацию и согласование волновода и резонаторной системы обеспечивает диэлектрический стержень 2 с от-

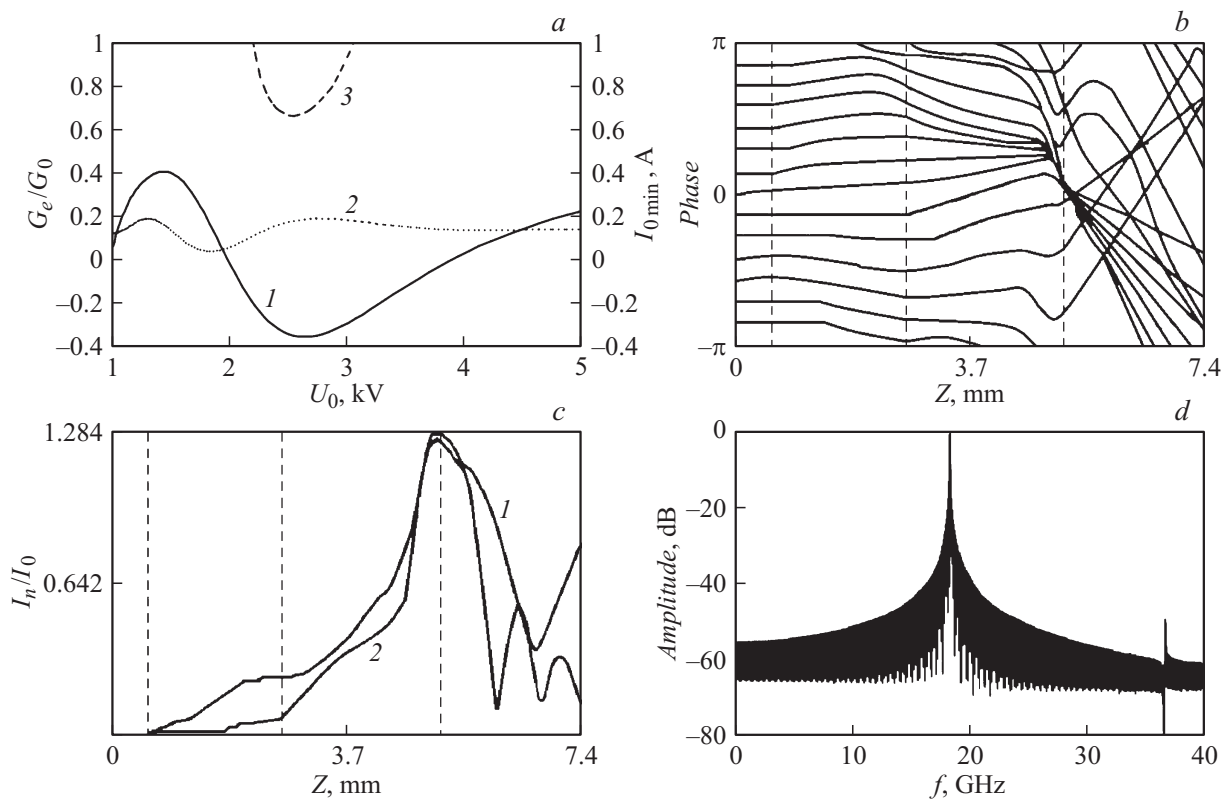


Рис. 2. Результаты численных расчетов модели монотрона: *a* — зависимости относительных значений электронной проводимости G_e/G_0 противофазного (кривая 1) и синфазного (кривая 2) видов колебаний и минимального значения пускового тока $I_{0\min}$ (кривая 3) от ускоряющего напряжения U_0 ; *b* — зависимости фазовых траекторий макрочастиц от длины пространства взаимодействия z , полученные с помощью дисковой модели клистрона; *c* — зависимости относительной амплитуды первой и второй гармоник конвекционного тока от длины пространства взаимодействия z ; *d* — характерный спектр генерируемого сигнала, полученный в результате численного трехмерного моделирования исследуемого монотрона.

проводимости G_e/G_0 и добротности Q по формулам, описанным в [11,12].

Результаты расчета показали, что для исследуемой трехзорной резонаторной системы неоднородность величины характеристического сопротивления в разных пролетных каналах более 10% (для центрального пролетного канала $\rho = 41.7 \text{ Ohm}$, а для крайних пролетных каналов $\rho = 36.5 \text{ Ohm}$).

Для дальнейших расчетов величины произведения ρM^2 для разных пролетных каналов усреднялись по поперечному сечению многолучевого электронного потока. По результатам численных расчетов определено также оптимальное значение нагруженной добротности резонатора $Q_{\text{ext}} = 259$.

На рис. 2, *a* (кривая 1) показана зависимость G_e/G_0 противофазного вида колебаний от ускоряющего напряжения U_0 для режима малого сигнала. Как видно из графика, получения максимального значения КПД следует ожидать на частоте 18 GHz при $2500 < U_0 < 2850 \text{ V}$ в области максимума отрицательных значений относительной электронной проводимости.

Минимальный ток ($I_{0\min} \approx 0.66 \text{ A}$), при котором возникает генерация, был рассчитан, исходя из известного

амплитудного условия самовозбуждения монотрона [13]. Зависимость $I_{0\min}$ от U_0 для противофазного вида колебаний представлена на рис. 2, *a* (кривая 3).

Следует отметить, что синфазный вид колебаний, который находится немного выше по частоте в рассматриваемом диапазоне ускоряющих напряжений, не должен возбуждаться, так как для этого вида колебаний значение относительной электронной проводимости положительно (кривая 2 на рис. 2, *a*).

Для режима работы, соответствующего максимальным отрицательным значениям относительной электронной проводимости G_e/G_0 (т.е. при $U_0 = 2650 \text{ V}$), был проведен анализ возможности возбуждения монотрона с помощью численного метода моделирования, основанного на использовании дисковой модели клистрона [14]. Результаты расчета фазовых траекторий и относительной амплитуды первой и второй гармоник конвекционного тока (I_n/I_0) от длины пространства взаимодействия z представлены на рис. 2, *b, c*.

Как видно из графиков, при выбранном режиме положение фазового фокуса находится в центре третьего зазора. При этом амплитуды первой и второй гармоник конвекционного тока принимают максимальные значе-

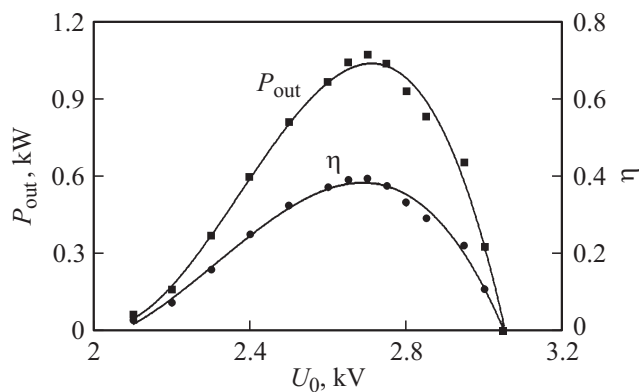


Рис. 3. Зависимости выходной мощности P_{out} и полного КПД η от ускоряющего напряжения U_0 при токе пучка 1 А.

ния, что обеспечивает достижение высоких значений электронного КПД.

Далее было проведено трехмерное численное моделирование режима генерации СВЧ-сигнала в рассматриваемом монотроне при наличии на входе в прибор изначально немодулированного моноростного многолучевого электронного потока. Для этого была разработана трехмерная математическая модель физического процесса взаимодействия электронов с ВЧ-полем резонатора сложной формы, основанная на решении самосогласованной системы уравнений Максвелла–Власова [15]. При этом электромагнитные поля в резонаторах вычислялись путем непосредственного решения уравнений Максвелла с помощью метода конечных разностей в прямоугольной системе координат с использованием сдвинутых относительно друг друга пространственно-временных сеток с постоянными шагами по времени. Электронный поток, движущийся в пролетных каналах, представлялся потоком „макрочастиц“ шарообразной формы с одинаковым удельным зарядом. Расчеты проводились с учетом внешнего магнитного поля, которое для рассматриваемого случая имело только продольную компоненту $B_z = 0.27$ Т.

На рис. 3 представлены расчетные зависимости выходной мощности в нагрузку P_{out} и величины полного КПД от ускоряющего напряжения U_0 . Как видно из графиков, максимумы выходной мощности микроволнового излучения и полного КПД достигаются одновременно при $U_0 = 2700$ В. При этом $P_{out} = 1067$ кВт, а КПД = 39.5%.

Как и ожидалось, возбуждения паразитных видов (в частности, синфазного вида) колебаний во всем рассматриваемом диапазоне U_0 не наблюдалось (рис. 2, d).

Таким образом, впервые численно показана возможность создания в К-диапазоне частот новых высокоэффективных (с полным КПД, около 40% и выходной мощностью свыше 1 кВт) малогабаритных многолучевых монотронов с электродинамической системой, состоящей из трех связанных через щель резонаторов, возбуждаемых на π -виде колебаний. Следовательно, переход к

трехззорной конструкции резонатора позволяет повысить КПД монотрона на 10% по сравнению с ранее исследованным монотроном с двухззорным резонатором [8].

Результаты были получены при выполнении научно-исследовательской работы в рамках проектной части государственного задания в сфере научной деятельности по заданию № 8.1065.2014/К.

Список литературы

- [1] Willert-Porada M. Advances in Microwave and Radio Frequency Processing: Report from the 8th International Conference on Microwave and High-Frequency Heating, Bayreuth, Germany. 2001. 792 p.
- [2] Feher L., Lambert E. // Proc. Technologies for Avionic, Mobility and Environmental Applications, Berlin. 2009. 114 p.
- [3] Thumm M., Feher L. // Proc. Int. Vacuum Electronics Conference (IVEC 2002), Monterey, California, USA. 2012. P. 371–372.
- [4] Steer B., Roitman A., Horoyski P. et al. // Proc. European Microwave Conference (EuMC), Manchester, 2011. P. 984–987.
- [5] Marder B., Clark C., Bacon L., Hoffman J., Lamke R., Coleman P. // Trans. on Plasma Science. 1992. P. 312–331.
- [6] Raymond W., Lemke M., Clark C., Marder B. // J. Appl. Phys. 1994. Vol. 75. № 10. P. 5423–5432.
- [7] Barroso J.J. // Transactions on Plasma Science. 2004. Vol. 32. N 3. P. 1205–1211.
- [8] Царев В.А., Мучкаев В.Ю., Шалаев П.Д. // Письма в ЖТФ. 2014. Т. 40. Вып. 7. С. 25–34.
- [9] Jun-Tao H., Hui-Huang Z., Bao-Liang Q., Yong-Gui L. // China Physics Letters. 2004. Vol. 21 (7). P. 1302–1305.
- [10] Мучкаев В.Ю., Царев В.А. // Свидетельство об официальной регистрации программы для ЭВМ № 2011611748 от 24.02.2011 г.
- [11] Григорьев А.Д., Янкевич В.Б. Резонаторы и резонаторные замедляющие системы СВЧ: Численные методы расчета и проектирования. М.: Радио и связь, 1984. 284 с.
- [12] Caryotakis G. High Power Klystrons: Theory and Practice at the Stanford Linear Accelerator Center. 2005. 138 p.
- [13] Федяев В.К., Акимова Т.С., Горлин О.А. // Вестник РГРТУ. 2010. Вып. 33. № 3. С. 64–68.
- [14] Teryaev V.E. // Proc. Int. Workshop on Pulsed RF Power Sources for Linear Colliders (RF-93). 1993. P. 161–166.
- [15] Трубецков Д.И., Храмов А.Е. Лекции по СВЧ электронике для физиков. Т. 1. М.: Физматлит, 2003. 496 с.