

11

Исследование многолучевого микроволнового генератора пролетного типа К-диапазона с электродинамической системой из двух связанных через щель резонаторов

© В.А. Царев, В.Ю. Мучкаев, П.Д. Шалаев

Саратовский государственный технический университет им. Гагарина Ю.А.
НПП „Алмаз“, Саратов
E-mail: muchkaev_vadim@mail.ru

Поступило в Редакцию 8 ноября 2013 г.

Показана возможность создания нового низковольтного многолучевого генератора монотронного типа, работающего в К-диапазоне длин волн. Принцип работы этого прибора основан на автогенерации электромагнитных колебаний при взаимодействии многолучевого электронного потока с высокочастотным электрическим полем π -вида в двухззорном щелевом резонаторе, имеющем различные по амплитуде ВЧ-напряжения на зазорах. Представлены результаты теоретических и экспериментальных исследований опытного 19-лучевого образца такого прибора, на котором при ускоряющем напряжении 2.6 kV и частоте 18.14 GHz впервые экспериментально получена мощность микроволнового излучения свыше 600 W с электронным КПД 45% и полным КПД 30%.

Одной из актуальных проблем современной вакуумной СВЧ-электроники является создание высокоэффективных малогабаритных источников микроволновой энергии, работающих в разных частотных диапазонах. Особый интерес представляет создание мощных СВЧ (уровни мощности < 10 kW) автогенераторов К-диапазона [1].

Исследования последнего времени показали, что одним из претендентов на роль оптимального по комплексу электрических и массогабаритных параметров автогенератора может стать прибор монотронного типа с двухззорным резонатором [2,3]. Согласно аналитической оценке [4], в многолучевом монотроне с двухззорным полуволновым

резонатором, имеющим протяженный первый зазор, при возбуждении на первой зоне π -вида колебаний возможно получение КПД до 42–46%. Однако в многолучевой конструкции этого устройства экспериментально получен полный КПД 12.5% [5].

Примерно 20 лет назад была предложена схема микроволнового монотронного генератора, свободного от этого недостатка. В основе этого прибора лежит возбуждение колебаний электронного потока в электродинамической системе, состоящей из двух связанных через щель резонаторов [6]. По существу эти резонаторы образуют двухзазорный резонатор, в котором могут быть одновременно возбуждены синфазный (0-вид) и противофазный (π -вид) виды колебаний. При этом рабочим видом обычно является противофазный вид колебаний, при работе на котором по теоретическим оценкам электронный КПД может достигать 40% [7]. Однако экспериментальные результаты, относящиеся к исследованию низковольтных многолучевых монотронов со связанными через щель резонаторами, отсутствуют.

Данная работа посвящена изложению результатов теоретических и экспериментальных исследований основных характеристик многолучевого монотрона К-диапазона длин волн с двухзазорным резонатором щелевого типа.

Электродинамическая система исследуемого монотрона, схематически показанная на рис. 1, *a*, выполнена в виде двухрезонаторного блока с прямоугольной формой корпуса 1, согласованного с волноводным выводом энергии 9. В состав электронно-оптической системы входит катодно-сеточный узел, предназначенный для формирования 19-лучевого электронного потока. Микропереванс одного луча можно было изменять в пределах от 0.2 до $0.35 \mu\text{A}/\text{V}^{3/2}$.

Для создания нарастающей амплитуды противофазного ВЧ-поля в зазорах и обеспечения оптимальной связи резонаторной системы с волноводом 9 введена асимметрия полостей резонаторов 2 и 3 с разных сторон центральной перегородки 4. Это было достигнуто за счет введения разницы в длинах резонатора примерно на 10–15%. Диаметр внешней части пролетной трубы 6 равен 3.4 mm, а расстояние между парциальными каналами 7 0.125 mm. Длины зазоров d_1 и d_2 , образованных между торцами боковых и центральной пролетной трубы длиной L , подбирались исходя из условий настройки на заданную рабочую частоту 18.14 GHz ($d_1 = 0.327 \text{ mm}$, $d_2 = 0.28 \text{ mm}$).

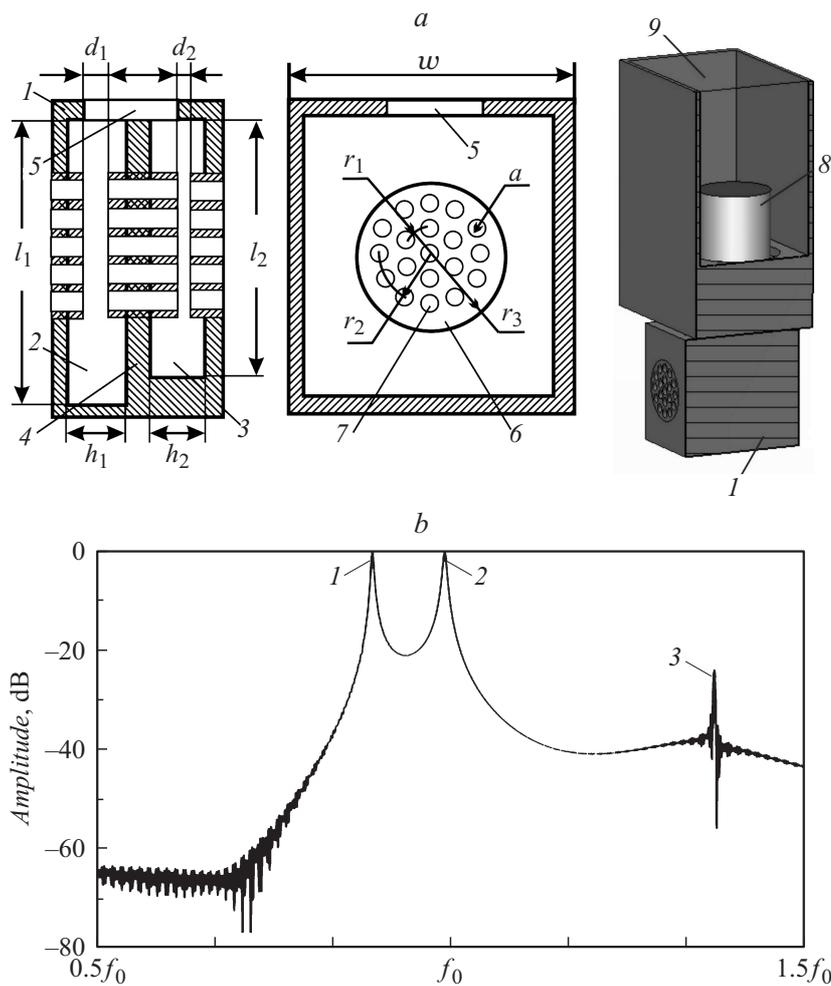


Рис. 1. Схематическое изображение электродинамической системы исследуемого монотрона (а) и ее амплитудно-частотная характеристика (b) в „холодном“ состоянии: 1 — синфазный, 2 — противофазный, 3 — паразитный вид колебаний.

Расстояние между центрами зазоров $S = L + (d_1 + d_2)/2$ было найдено исходя из фазового условия самовозбуждения монодрона с двухзазорным резонатором [8]:

$$\theta_S = \gamma d_1/2 + \gamma d_2/2 + \gamma L = 2\pi(0.25 + n), \quad (1)$$

где θ_S — угол пролета центра электронных сгустков, $n = 0, 1, 2, \dots$ — номер зоны генерации, $\gamma = 2\pi f/v_0$, f — частота генерируемого сигнала, $v_0 = \sqrt{2eU_0/m}$, U_0 — ускоряющее напряжение, e и m — заряд и масса электрона соответственно.

Непосредственно к щели связи примыкает диэлектрический стержень 8 с относительной диэлектрической проницаемостью $\epsilon = 8.6$, который обеспечивает согласование волновода и резонаторной системы, а также вакуумную изоляцию прибора.

Многолучевой электронный поток в пределах цилиндрической граници с радиусом меньше радиуса пролетных каналов $a = 0.25$ mm удерживается постоянным магнитным полем с магнитной индукцией 270–280 mT.

В ходе исследований сначала была рассчитана амплитудно-частотная характеристика резонансной системы в „холодном“ состоянии с помощью трехмерной программы REZON [9], в основе которой лежит решение уравнений Максвелла методом конечных разностей во временной области.

Как показали результаты расчета (рис. 1, *b*), в рассматриваемом интервале частот у исследуемой резонансной системы есть 3 вида колебаний. Анализ распределения в резонансном блоке электромагнитного поля показал, что первый вид колебаний является синфазным видом, второй — противофазным. Третий вид колебаний имеет частоту, значительно выше рабочей частоты f_0 , поэтому он считается паразитным видом и в дальнейшем не рассматривается.

Собственная добротность Q_0 , определенная по результатам холодных измерений, составила 820 единиц. Нагруженная добротность резонансной системы Q_z подбиралась путем изменения размеров щели связи 5 и могла в небольших пределах регулироваться резонансным стержнем, установленным в выходном прямоугольном волноводе. Характеристическое сопротивление $\rho = R/Q$ (где R — эквивалентное сопротивление резонатора) щелевого резонатора на π -виде, рассчитанное в центральном пролетном канале, оказалось равным 38.4 Ω .

Для работы монотрона в качестве автогенератора необходимо выполнение амплитудного условия самовозбуждения [8]. Оно достигается, когда электронная проводимость G_e , вносимая модулированным электронным потоком в резонатор, становится отрицательной, что соответствует отдаче энергии от электронного потока во внешнюю цепь зазора.

Результаты расчета относительной шунтирующей электронной проводимости G_e/G_0 на противофазном виде колебаний от угла пролета θ_s двойного бессеточного зазора при $n = 1$, $b/a = 0.66$, $d_1/a = 1.31$, $d_2/a = 1.12$, $L/a = 6.8$, токе $I_0 = 0.8$ А показаны на рис. 2, *a*. Расчеты выполнены по формулам работы [10]. Область самовозбуждения на противофазном виде колебаний начинается при углах пролета θ_s , превышающих 2π , и заканчивается при углах пролета приблизительно 2.9π . Наиболее благоприятные условия для самовозбуждения имеются при угле пролета θ_s , приблизительно равном $2.5\pi = 7.85$. Это значение хорошо согласуется с расчетом по формуле (1).

Отметим, что синфазные и противофазные колебания одновременно никогда не возбуждаются, поскольку их зоны неустойчивости по углу пролета не совпадают. Это видно из зависимостей относительных значений шунтирующей электронной проводимости от ускоряющего напряжения, приведенных на рис. 2, *b*.

Далее было проведено трехмерное моделирование процессов возникновения и генерации СВЧ-колебаний в монотроне с многолучевым электронным потоком. Для этого была использована математическая модель, основанная на решении самосогласованной системы уравнений Максвелла–Власова в трехмерном случае. Электромагнитные поля вычисляются непосредственно решением уравнений Максвелла с помощью метода конечных разностей, для чего на исследуемую резонансную систему была наложена прямоугольная пространственно-временная сетка. Электронный поток, движущийся в пролетных каналах, был представлен моноскоростным потоком „макрочастиц“ шарообразной формы с одинаковым удельным зарядом.

Анализ картины распределения ВЧ-поля в зазорах вдоль длины пространства взаимодействия (рис. 2, *c*) и спектра возбуждаемых колебаний (рис. 2, *d*) показывает, что максимальная выходная мощность наблюдается на частоте около 18 GHz на π -виде при относительной амплитуде ВЧ-напряжения в выходном зазоре, равной $\xi_2 = U_{m2}/U_0 = 1.73$, и ускоряющем напряжении 2.6 kV. При этом параметры электронного

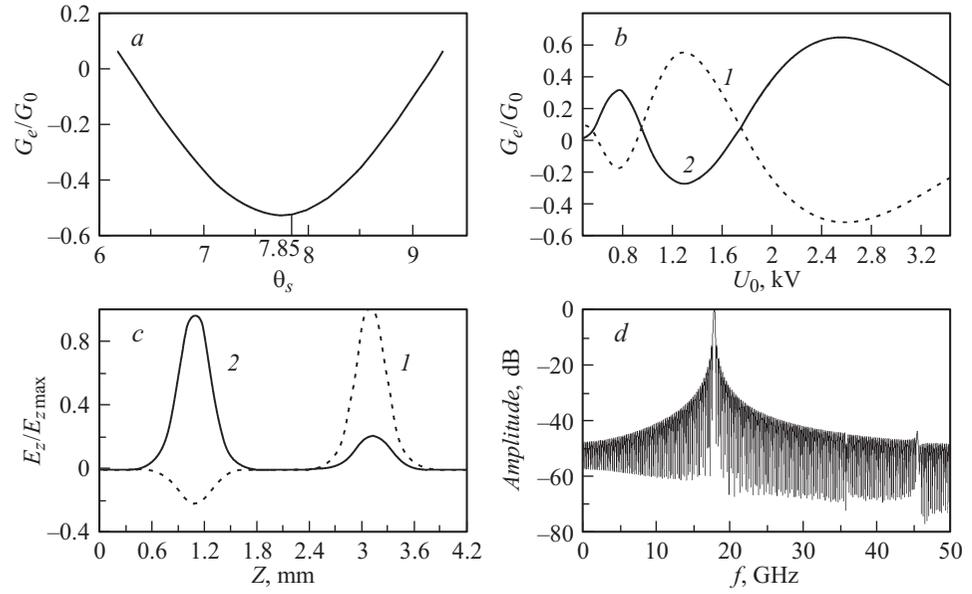


Рис. 2. Результаты численных расчетов модели монотрона: *a* — зависимость относительного значения шунтирующей электронной проводимости G_e/G_0 от угла пролета между центрами зазоров θ_s в случае возбуждения противофазного вида колебаний; *b* — зависимости относительных значений шунтирующей электронной проводимости G_e/G_0 от ускоряющего напряжения U_0 в случае возбуждения противофазного (кривая 1) и синфазного (кривая 2) видов колебаний; *c* — распределение продольной компоненты электрического поля основного противофазного (кривая 1) и синфазного (кривая 2) видов колебаний в центральном пролетном канале вдоль длины монотрона; *d* — характерный спектр генерируемого сигнала, полученный в результате численного моделирования исследуемого монотрона.

потока и резонатора качественно соответствуют аналитическим условиям баланса фаз (1) и баланса амплитуд.

По результатам теоретических и численных исследований был изготовлен опытный образец многолучевого моноотрона, конструкция которого соответствует рис. 1, *a*.

Результаты экспериментальных исследований подтвердили возможность возбуждения на противофазном виде колебаний мощного выходного сигнала на частоте 18.14 GHz в области ускоряющих напряжений 2–3 kV, что в целом совпадает с аналитическими и численными расчетами. Паразитной генерации на синфазном виде колебаний в ходе экспериментов не наблюдалось.

Зависимости выходной мощности и полного КПД моноотрона в зависимости от величины ускоряющего напряжения для двух разных токов пучка показаны на рис. 3, *a, b*. Результаты измерений отмечены точками, а результаты численных расчетов — штриховыми линиями.

Видно, что при токе 0.8 А разница в расчетных и экспериментальных значениях максимальной выходной мощности и максимального полного КПД прибора $\eta = \eta_{res}\eta_e$ (где η_e — электронный КПД, η_{res} — контурный КПД) не превышает 1–2%. Однако при увеличении тока до 1 А погрешность расчета этих параметров возрастает до 15%. Из рисунков видно, что в эксперименте генерация СВЧ-колебаний наблюдалась в более узкой области ускоряющих напряжений по сравнению с численными расчетами.

Для оценки величины электронного КПД воспользуемся известными из теории клистрона уравнениями, описывающими связь полного КПД и выходной мощности P_{out} с параметрами процесса взаимодействия

$$\eta_{res} = \frac{0.5(\xi_2^2 U_0^2 + 2P_{out}\rho Q_0)}{\rho Q_0 p U_0^{5/2}}, \quad (2)$$

где $p = p_{\mu 1} N$ — полный первеанс потока, N — количество электронных лучей.

Зависимость электронного КПД от микропервеанса парциального луча, рассчитанная с помощью формулы (2), показана на рис 3, *c*. Видно, что существует оптимальное значение микропервеанса, при котором силы пространственного заряда электронного луча компенсируют эффект „расслоения“, связанный с неоднородной скоростной модуляцией

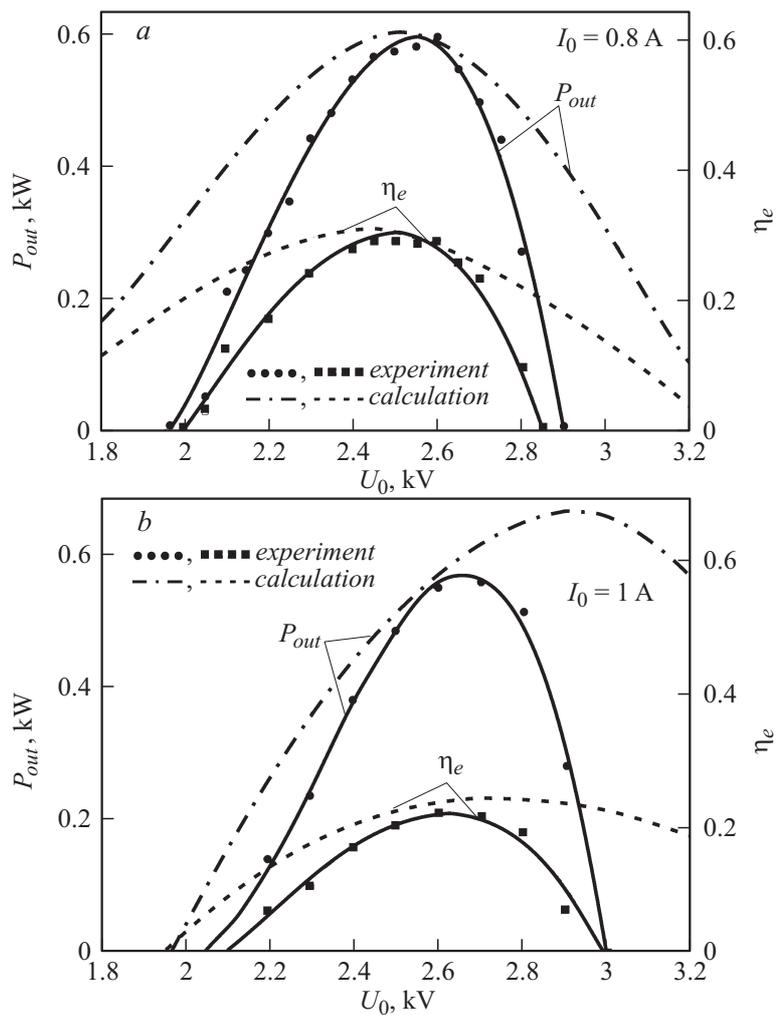


Рис. 3. Результаты численных (штриховые линии) и экспериментальных (обозначены точками) исследований: зависимости выходной мощности P_{out} и полного КПД η от ускоряющего напряжения U_0 при токах пучка: *a* — 0.8 А и *b* — 1 А; *c* — зависимость электронного КПД η_e от микропереванса $p_{\mu 1}$ частичного пучка.

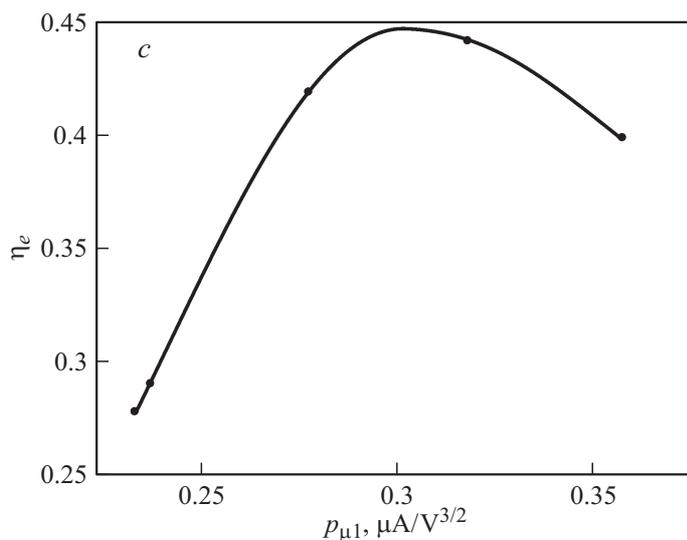


Рис. 3 (продолжение).

в каждом пролетном канале электронов, пролетающих пространство взаимодействия на разных расстояниях от центра этих каналов.

Максимальная мощность 650 W генерируемых СВЧ-колебаний была получена в ходе эксперимента при токе пучка 1 A и ускоряющем напряжении 2700 V. Максимальный полный КПД монотрона, равный 30%, достигается при токе пучка 0.8 A и ускоряющем напряжении 2500 V.

Таким образом, впервые теоретически и экспериментально подтверждена возможность создания в К-диапазоне новых высокоэффективных (с электронным КПД около 45% и полным КПД, равным 30%) малогабаритных многолучевых монотронов с электродинамической системой, состоящей из двух связанных через щель резонаторов, возбуждаемых на π -виде колебаний. Новый прибор имеет меньшие, по сравнению с известными электровакуумными приборами, применяемыми в К-диапазоне, массогабаритные параметры. Кроме того, он имеет наименьшую для известных СВЧ-приборов величину отношения ускоряющего напряжения к выходной мощности — 0.4 kV/kW.

Список литературы

- [1] *Feher L.E.* // Energy efficient microwave systems: materials processing technologies for avionic, mobility and environmental applications. Berlin, 2009. P. 130.
- [2] *Barroso J., Castro P., Rossi Y., Gonsales J.* // Proc. Int. Vacuum Electronics Conference (IVEC 2009). Rome, Italy, 2009. P. 433.
- [3] *Akafyeva N.A., Miroshnichenko A.Yu., Tsarev V.A.* // Proc. Int. Vacuum Electronics Conference (IVEC 2012). Monterey, California, USA, 2012. P. 87.
- [4] *Федяев В.К., Горлин О.А.* // Радиотехника и электроника. 2010. Т. 55. № 12. P. 1050.
- [5] *Мелешкевич П.М., Пунгин В.И., Стройков Е.А.* и др. Патент RU № 2391739, МПК7 Н 01 J25/74. 2008.
- [6] *Marder B., Clark C., Bacon L., Hoffman J., Lakme R., Coleman P.* // Trans. On Plasma Science. 1992. P. 312.
- [7] *Barroso J.J.* // Transactions on Plasma Science. 2004. V. 32. N 3. P. 1205.
- [8] *Федяев В.К., Акимова Т.С., Горлин О.А.* // Вестник РГРТУ. 2010. В. 33. № 3. С. 64.
- [9] *Мучкаев В.Ю., Царев В.А. REZON* // Свидетельство об официальной регистрации программы для ЭВМ. № 2011611748 от 24.02.2011.
- [10] *Голубев С.Н., Светлаков В.М., Царев В.А.* // Вопросы электронной техники: Межвуз. научн. сб. Саратов: СПИ, 1988. С. 17.