

Компьютерное моделирование нелинейных нестационарных процессов в двухкаскадном клистронном генераторе*

К. В. Белов¹✉, Н. М. Рыскин^{1,2}, В. В. Емельянов¹

¹Саратовский национальный исследовательский государственный университет имени Н.Г. Чернышевского

²Саратовский филиал Института радиотехники и электроники им. В. А. Котельникова РАН

✉ belovkv@sgu.ru

В последнее время значительные усилия исследователей направлены на разработку миниатюрных источников колебаний миллиметрового и субмиллиметрового диапазонов, изготавливаемых при помощи современных технологий вакуумной микроэлектроники, см., например, обзорные работы [1, 2]. Недавние технологические успехи вакуумной микроэлектроники открыли пути создания миниатюрных аналогов «классических» вакуумных электронных приборов, таких как отражательный клистрон, лампы бегущей и обратной волны [4], клистроны с распределенным взаимодействием др. [3]. Они будут иметь огромное значение для систем связи, радиолокации, спектроскопии, обработки материалов и т. д. Естественным способом преодолеть эти трудности является переход к многолучевым конструкциям. В работе [5] была предложена схема двухкаскадного генератора из двух пролётных двухрезонаторных клистронов (рис. 1).

Уравнения самовозбуждения резонаторов имеют вид:

$$\dot{A}_{11} + \frac{\omega_0}{2Q_0} A_{11} = \frac{i\omega_0\beta}{2} (A_{11} - A_{22}), \quad (1)$$

$$\dot{A}_{12} + \frac{\omega_0}{2Q_L} A_{12} = \frac{i\omega_0\beta}{2} (A_{12} - A_{21}) - i\omega_0 K M I_0 J_1(X_1) e^{i(\phi_{11} - \theta_0)}, \quad (2)$$

где $X_1 = M |A_{11}| \theta_0 / 2V_0$ – параметр группировки электронного пучка, $\theta_0 = \omega_0 l / v_0$ – угол пролета в пространстве между центрами зазоров резонаторов, $\varphi_{11} = \arg(A_{11})$ – фаза поля во входном резонаторе, β – коэффициент связи, Q_0 – холодная добротность резонаторов, Q_L – нагруженная добротность выходных резонаторов.

Для нахождения характеристического уравнения генератора требуется отыскать решение в виде гармонического сигнала. После линеаризации получим характеристическое уравнение в виде:

*Работа поддержана РФФИ, грант № 14-02-31410.

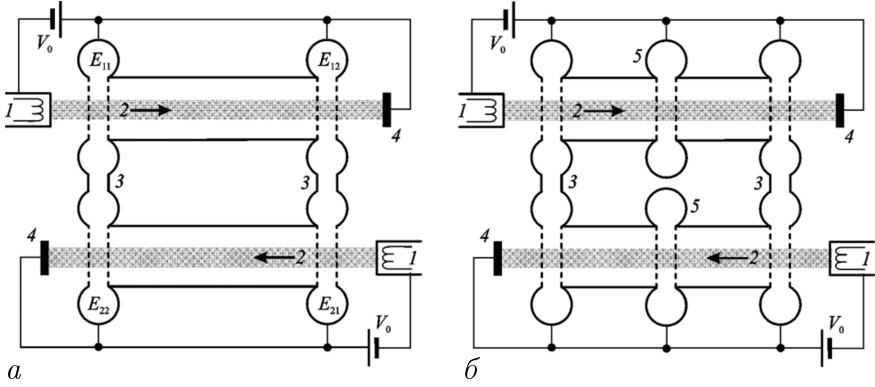


Рис. 1. Схема генератора, состоящего из связанных двухрезонаторных (а) и трёхрезонаторных (б) клистронов. 1 — катод, 2 — электронный пучок, 3 — связанные резонаторы, 5 — промежуточный резонатор. Промежуточные резонаторы не связаны.

$$D(\omega) = (i(\Delta'(\omega) - \mu') + 1)(i(\Delta(\omega) - \mu) + 1) + \mu\mu'. \quad (3)$$

Здесь введены новые безразмерные переменные: $\Delta = 2Q_0(\omega - \omega_0)/\omega_0$ — безразмерная отстройка от несущей частоты, $\mu = \beta Q$ — параметр связи, $\mu' = \mu(Q_L/Q_0)$ — параметр связи, нормированный на нагруженную добротность, $\Delta' = \Delta(Q_L/Q_0)$ — отстройка от несущей частоты, нормированная на нагруженную добротность. В левой части уравнения стоит функция:

$$D(\omega) = \pm 2\varepsilon Q_L Q_0 \mu e^{-i\theta_0(1+\Delta/2Q_0)}. \quad (4)$$

Аналогичным образом возможно получить характеристическое уравнение для генератора, состоящего из двух трёхрезонаторных клистронов. Для такой системы оно выглядит следующим образом:

$$D_3(\omega) = [(1 + i(\Delta' - \mu'))(1 + i(\Delta - \mu)) + \mu\mu'] \frac{(1 + i\Delta)}{\mu}, \quad (5)$$

где

$$D_3(\omega) = \pm 4\varepsilon^2 Q_L Q_0 \theta_{12} \theta_{23} e^{-i(\theta_{13}(1+\Delta/2Q_0) + \frac{\pi}{2})}. \quad (6)$$

Параметры генераторов, при которых производились расчёты представлены в таблице (). Все параметры для двух- и трёхрезонаторных клистронов идентичны.

Таблица

Добротность входных резонаторов, Q_0	800
Добротность выходных резонаторов, Q_L	300
Волновое сопротивление, Z	35.5 Ом
Расстояние между резонаторами, l	5 мм
Эффективная ширина зазоров, d	0.3 мм
Собственная частота, $\omega_0/2\pi$	95 ГГц
Радиус пучка, r_b	0.225 мм
Коэффициент связи, β	0.002

Граница самовозбуждения проходит по нижней огибающей зон генерации. Из сравнения рис. 2, а и 2, б видно, что количество зон генерации на одном диапазоне напряжений выросло, вместе с тем значительно снизился стартовый ток генератора.

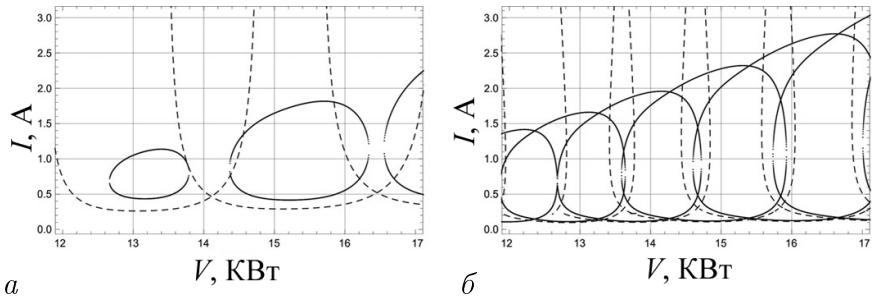


Рис. 2. Зависимость величины стартового тока от ускоряющего напряжения для двухрезонаторных (а) и трёхрезонаторных (б) клистронов. Пунктирной линией изображены кривые, соответствующие нижней границе зон генерации, построенным для кинематического случая. Сплошными линиями построены верхние и нижние границы самовозбуждения с учетом пространственного заряда. На графиках изображены зоны генерации с номерами $n = 11...13$ (а) и $n = 23...28$ (б)

В работе была исследована модель двухкаскадного генератора на основе связанных пролётных клистронов. Развита линейная теория, позволяющая найти условия самовозбуждения в кинематическом приближении и с учётом пространственного заряда. Построены зоны генерации на плоскостях частота – напряжение, напряжение – ток. Учтено влияние сил пространственного заряда на стартовые характеристики генератора, численно найдены зоны генерации для двух- и трёхрезонаторных связанных клистронов с учётом сил пространственного заряда.

Список литературы

1. *Booske J. H.* Plasma physics and related challenges of millimeter-wave-to-terahertz and high power microwave generation // *Phys. Plasmas*. 2008. Vol. 15, no. 5. 055502.
2. *Booske J. H., Doobbs R. J., Joye C. D., Kory C. L., Neil G. R., Park G.-S., Park J., Temkin R. J.* Vacuum electronic high power terahertz sources // *IEEE Trans. Terahertz Sci. Technol.* 2011. Vol. 1, no. 1. P. 54–75.
3. *Трубецков Д. И., Вдовина Г. М.* О современном состоянии сверхвысокочастотных вакуумных электронных и микроэлектронных приборов с управляемой эмиссией // *Известия вузов. ПНД*. 2013. Т. 21, № 1. С. 35–66.
4. *Трубецков Д. И., Храмов А. Е.* Лекции по сверхвысокочастотной электронике для физиков. В 2 т. Т. 1. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2003. 496 с.
5. *Shin Y.-M., Han S. T., Jeon S. G., Jang K. H., So J. K., Park G.-S.* Development of counter-streaming multi-beam oscillator based on cold cathode // *Technical Digest of the 17th International Vacuum Nanoelectronics Conference, IVNC 2004*. P. 154–155.

Информация об авторах

Белов Кирилл Валентинович, студент, кафедра динамических систем Саратовского национального исследовательского государственного университета имени Н.Г. Чернышевского, belovkv@sgu.ru, SPIN: —

Рыскин Никита Михайлович, доктор физико-математических наук, профессор, главный научный сотрудник лаборатории вакуумной микро- и наноэлектроники Саратовского филиала Института радиотехники и электроники им. В. А. Котельникова РАН, заведующий кафедрой динамических систем Саратовского национального исследовательского государственного университета имени Н.Г. Чернышевского, RyskinNM@gmail.com, SPIN: 6789-9002

Емельянов Валерий Валерьевич, кандидат физико-математических наук, доцент, кафедра динамических систем Саратовского национального исследовательского государственного университета имени Н.Г. Чернышевского, emvaleriy@gmail.com, SPIN: 5315-2196