

Оценка предельных токов в пролетных каналах микроволновых устройств

В. М. Пикунов*

Московский государственный университет имени М.В.Ломоносова, физический факультет, кафедра математики
Россия, 119991, Москва, Ленинские горы, д. 1, стр. 2

В работе рассматривается численный метод расчета предельных вакуумных токов в волноводе с частичным заполнением диэлектриком.

PACS: 41.90.+e УДК: 537.872.2.

Ключевые слова: предельный вакуумный ток, волновод с частичным диэлектрическим заполнением.

Размеры пролетных каналов микроволновых устройств определяются: типом устройства, рабочей длиной волны (рабочей частотой), требуемой мощностью электронного пучка и многими другими факторами.

С появлением эффективных и доступных источников сильноточных релятивистских электронных пучков (СРЭП) резко возросли выходные мощности практически всех известных ранее типов СВЧ приборов. Однако, успехи в ускорительной технике и разработке источников СРЭП не могут быть использованы в полной мере в классических вакуумных СВЧ устройствах, таких как клистроны, ЛБВ, ЛОВ, и др. Дело в том, что в этих приборах ток пучка ограничен сверху так называемым «предельным вакуумным» током. Для реализации преимуществ использования СРЭП необходимо использовать устройства со сверхразмерные замедляющие системами (ЗС), например, многоволновые черенковские генераторы (МВЧГ) [1].

Для увеличения предельного тока электронного пучка могут использоваться микроволновые устройства на основе диэлектрической ЗС. Например, черенковский диэлектрический мазер [2] или релятивистский генератор поверхностной волны (РГПВ) [3].

Другим предельным случаем являются электронные устройства с распределенным взаимодействием электромагнитных полей с электронными потоками в миллиметровом и субмиллиметровом диапазонах длин волн [4]. Для эффективного взаимодействия электронного потока с электромагнитными полями многозакорных резонаторов необходимы пролетные каналы диаметром сравнимым и меньше рабочей длины волны. Это приводит к существенному уменьшению предельных токов и выходной мощности устройств.

Указанные выше обстоятельства требуют наличия методов расчета для нахождения предельных токов в пролетных каналах микроволновых устройств для определения их возможных предельных уровней выходной мощности.

Рассмотрим многослойную модель ЗС на основе круглого волновода с частичным заполнением диэлектриком, нагруженную сильноточным кольцевым элект-

ронным пучком, фокусируемым бесконечно большим магнитным полем, рис. 1. Запишем нелинейную краевую задачу для уравнения Пуассона для оценок провисания потенциала $U(r)$ и предельного вакуумного тока I_{inj} инжектируемого в пролетный канал:

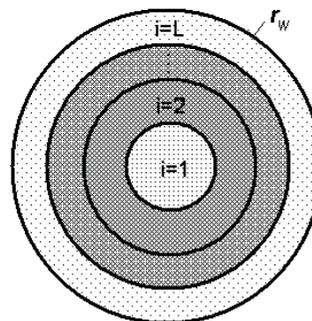


Рис. 1: Модель поперечного сечения волновода сравнения с частичным заполнением диэлектриком и нагруженного электронным пучком

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial U}{\partial r} \right) = - \frac{I_{inj}}{\varepsilon_0 \varepsilon v_0 S_0} \Psi(r), \quad 0 < r < r_w, \quad (1)$$

$$I_{inj} = \rho_{inj} v_{inj} S_0 = \rho_0 v_0 S_0, \quad (2)$$

$$v_0 = c \sqrt{1 - 1/(1 + |e_0|U(r)/m_0 c^2)^2}, \quad (3)$$

$$|U(0)| < \infty, \quad U(r_w) = U_d, \quad (4)$$

где: $\Psi(r) = \begin{cases} 1, & r \in [r_{bi}, r_{be}] \\ 0, & r \notin [r_{bi}, r_{be}] \end{cases}$, r_{bi} , r_{be} — внутренний и внешний радиусы инжектируемого кольцевого электронного пучка.

Здесь первое уравнение (1) — нелинейное уравнение Пуассона. Второе (2) — уравнение непрерывности для

*E-mail: vmpikunov@mail.ru

инжектируемого электронного пучка. Третье (3) — релятивистский закон сохранения потенциальной и кинетической энергии электрона. Соотношения (4) — краевые условия для скалярного потенциала $U(r)$.

Разобьем поперечное сечение волновода радиуса r_w , на L кольцевых слоев, см. рис. 1. Пусть каждый k -тый слой характеризуется следующими параметрами: r_{k+1}, r_k — внешний и внутренний радиусы слоя; $I_{inj,k} = S_k \rho_k \nu_k$ — конвекционный ток; ρ_k, ν_k — плотность заряда и продольная скорость электронов; ε_k — относительная диэлектрическая проницаемость, усредненная по площади поперечного сечения слоя S_k ; $U_k(r)$ и $E_{rk}(r)$ — потенциал и радиальная компонента напряженности электрического поля в слое; $k = \overline{1, L}$. Найдем решение нелинейной задачи (1)–(4) методом последовательных итераций на каждой из которых будем считать плотность электронов $\rho_k^j = \frac{I_{inj,k}}{\nu_k^{j-1} S_k}$ величиной, не зависящей от радиальной координаты r . Здесь $k = \overline{1, L}$; j — номер итерации. Скорость электронов определяется по формуле (3) на предыдущем шаге по итерациям, в середине каждого слоя. Запишем решение для потенциала и напряженности электрического поля на j -ой итерации в k -том слое:

$$U_k^j(r) = -\frac{\rho_k^j r^2}{\varepsilon_k \varepsilon_0 4} + \alpha_k \ln\left(\frac{r}{r_w}\right) + \beta_k, \quad (5)$$

$$E_{rk}^j(r) = \frac{\rho_k^j r}{\varepsilon_k \varepsilon_0 2} - \frac{\alpha_k}{r}. \quad (6)$$

Вспользуемся условиями непрерывности искомого потенциала U и радиальной компоненты индукции электрического поля $\varepsilon_0 E_r$ на границах слоев, и граничными условиями (4). На каждой итерации, полученную таким образом систему линейных алгебраических уравнений, будем решать методом прогонки. Прямой ход прогонки позволяет найти коэффициенты α_k :

$$\alpha_{k+1} = \frac{\varepsilon_k}{\varepsilon_{k+1}} \alpha_k + \frac{\rho_{k+1}^j - \rho_k^j r_k^2}{\varepsilon_0 \varepsilon_{k+1} 2}, \quad (7)$$

где: $k = \overline{1, L}$, $\alpha_1 = 0$.

На обратном ходе прогонки определяются коэффициенты β_k :

$$\beta_{k-1} = \beta_k - \left(\frac{\rho_k^j}{\varepsilon_0 \varepsilon_k} - \frac{\rho_{k-1}^j}{\varepsilon_0 \varepsilon_{k-1}} \right) \frac{r_{k-1}^2}{4} + (\alpha_k - \alpha_{k-1}) \ln \frac{r_{k-1}}{r_w}, \quad (8)$$

где: $k = \overline{L, 2}$, $\beta_L = U_d + \frac{\rho_L}{\varepsilon_0 \varepsilon_L} \frac{r_w^2}{4}$.

Число слоев L выбирается из условия необходимой точности нахождения распределения искомого величин по радиусу ЗС. Для достижения сходимости результата обычно достаточно 10–15 итераций. На рис. 2

представлена кривая скалярного потенциала в волноводе с диэлектрической втулкой, для случая следующих параметров: $r_w = 2,5$ см, $r_\varepsilon = 1,5$ см, $r_{bi} = 1,1$ см, $r_{be} = 1,3$ см, $\varepsilon = 3,67$ (текстолит), $I_0 = 0,2$ кА, $U_d = 117$ кВ. При этом выбиралось стационарная ветвь решения. Наличие кольцевого электронного пучка в волноводе приводит к провисанию скалярного потенциала по его радиусу. Для уменьшения провисания электронного потока необходимо транспортировать его вблизи стенок ЗС. Наличие диэлектрического заполнения также приводит к уменьшению провисания потенциала (рис. 2) и увеличению предельного вакуумного тока пучка. Рассматриваемый алгоритм, позволяет находить предельные токи I_{lim} достижимые в волноводе с частичным заполнением диэлектриком. Этот режим определялся началом области расходимости итераций. Критический ток рассматриваемого регулярного волновода составляет $I_{lim} \approx 0,67$ кА. В случае наличия диэлектрической втулки предельный ток увеличивается примерно в два раза до $I_{lim} \approx 1,3$ кА.

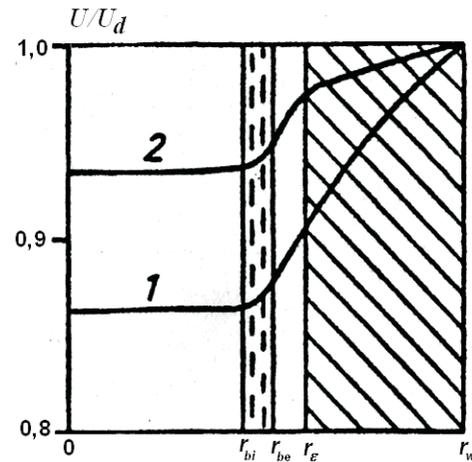


Рис. 2: Распределение постоянной составляющей потенциала по радиусу для регулярного (1) и частично-заполненного диэлектриком, того же радиуса (2) волновода, нагруженных трубчатый электронным пучком

Увеличение выходной мощности и длительности импульса микроволнового излучения остается одной из наиболее важных проблем физики релятивистских микроволновых устройств. Уровень мощности порядка 1 ГВт и длительность импульса более 1 мс являются желательными параметрами для многих разрабатываемых СВЧ источников. Уровни мощности 0,5–15 ГВт достижимы с помощью уже существующих устройств, например, с помощью МВЧГ ($P_{свч} = 15$ ГВт, $U_0 = 2,1$ МВ, $I_b \approx 15$ кА, $\tau_{свч} = 60$ нс, КПД=50%) [1]. Оценки предельного уровня токов кольцевого электронного пучка конечной толщины транспортируемого в круглом волноводе для различных параметров сверхразмерности D/λ , в присутствии бесконечного магнитного поля и для фиксированной частоты $f = 10$ ГГц представлены на рис. 3. Зазор,

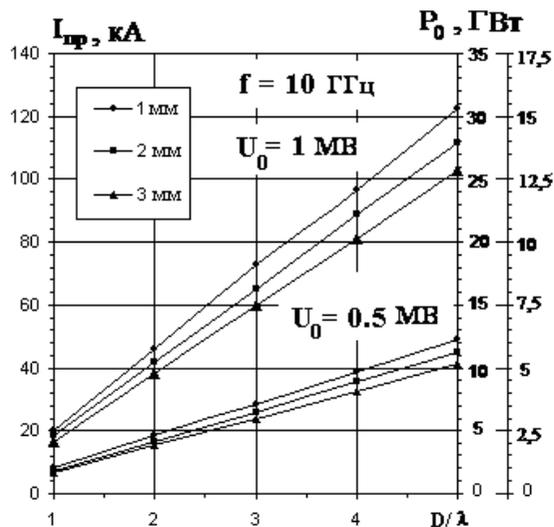


Рис. 3: Графики оценок предельного тока электронного пучка и выходной мощности МВЧГ в зависимости от параметра D/λ . Первая шкала справа соответствует $U = 1 \text{ MV}$, вторая $U = 0,5 \text{ MV}$

между внешней стороной электронного пучка и внутренней стороной волновода, фиксирован и выбирался равным 5 мм; толщина электронного кольца выбиралась равной 1 мм, 2 мм или 4 мм. Напряжение диодного ускоряющего промежутка составляет $U = 1 \text{ MV}$ и $U = 0,5 \text{ MV}$.

- [1] Бугаев С.П., Канавец В.И., Кошелев В.И., Черепенин В.А. Релятивистские многоволновые СВЧ-генераторы. (Новосибирск: Наука, Сибирское отделение. 1991. 296 с.).
- [2] Шлапаковский А.С. ЖТФ. **67**, В. 5. С. 66. (1997).

- [3] Вдовин В.А., Корженевский А.В., Черепенин В.А. Известия АН. Сер. Физич. **67**, № 12. С. 1665. (2003).
- [4] Тореев А.И., Федоров В.К. Прикладная физика № 5. С. 117. (2008).

Estimation of limiting currents in the transit channels microwave devices

V. M. Pikunov

Department of mathematics, Faculty of Physics, Lomonosov Moscow State University
 Moscow, 119991, Russia
 E-mail: vmpikunov@mail.ru

The paper deals with a numerical method for calculating the limiting current in vacuum waveguide partially filled with dielectric.

PACS: 41.90.+e

Keywords: the limiting current, waveguide partially filled with dielectric.

Сведения об авторах

1. Пикунев Виктор Михайлович — канд. физ.-мат. наук, старший преподаватель; тел.: (495) 939-10-33, e-mail: vmpikunov@mail.ru.