

01;09;10

О предельно допустимых уровнях мощности импульсных релятивистских СВЧ-генераторов различных типов

© А.Н. Диденко, М.С. Дмитриев

Московский государственный инженерно-физический институт

Поступило в Редакцию 13 января 2000 г.

Рассмотрен вопрос генерации мощных СВЧ-колебаний на основе сильноточных электронных ускорителей. Вычислены предельно допустимые мощности основных типов СВЧ-приборов, таких как лампа бегущей волны, клистрон, магнетрон и виркатор.

В настоящее время важной проблемой является увеличение импульсной мощности СВЧ-приборов, позволяющих генерировать СВЧ-импульсы наносекундной длительности с мощностью в несколько единиц и десятков гигаватт [1]. Целью данного сообщения является сравнение предельно допустимых уровней мощности, которую можно генерировать в том или ином релятивистском СВЧ-генераторе, в зависимости от параметров используемых сильноточных электронных ускорителей и типа СВЧ-генератора.

Как было показано в [2], выражение для предельно допустимого уровня мощности СВЧ-генератора можно представить в виде

$$W_{rad} = 2\pi\alpha(\gamma - 1)\frac{S}{\lambda^2}W_A, \quad (1)$$

где

$$W_A = 8.5 \text{ GW}, \quad \alpha = \frac{\int [\mathbf{E}\mathbf{H}^*] dS'}{E_0^2 S}$$

— некоторый безразмерный коэффициент, зависящий от вида используемого СВЧ-генератора, вида возбуждаемых в нем типов колебаний и формы и места расположения отверстия для вывода энергии. В

частности, для цилиндрического резонатора, в котором возбуждена волна E_{011} , было получено

$$W_{rad} \approx (\gamma - 1)W_A \quad (2)$$

для наиболее приемлемых параметров резонатора и основного вида колебаний.

Эти выражения были получены в приближении, что движение частиц в переменных полях, изменяющихся с частотой ω , можно описать с помощью потенциала $U_{r.f.} = \frac{eE_0^2}{4m\omega^2}$, где E_0 — амплитуда наведенного электрического поля [3]. Однако движение частиц в переменных полях не всегда можно описать с помощью такого потенциала.

Поэтому определим предельные допустимые уровни мощности основных используемых импульсных релятивистских СВЧ-генераторов, не вводя приближения, использованные для вывода этого выражения в [2].

Как известно, выражение для мощности, генерируемой в СВЧ-системе с импедансом Z , можно записать в следующей форме:

$$W = \frac{U_{out}^2}{Z} = \frac{250(\gamma - 1)^2}{Z} \text{GW}, \quad (3)$$

где $U_{out} = \frac{mc^2(\gamma-1)}{e}$ — потенциал внешнего поля, определяемый кинетической энергией электронного пучка. Отсюда видно, что так как U_{out} зависит только от параметров электронного ускорителя, то увеличение СВЧ-мощности возможно только при использовании для генерации СВЧ-структур с малым Z . Сравним эти выражения для ламп бегущих волн, магнетронов, клистронов и виркаторов.

Выражение для средней во времени СВЧ-мощности, наводимой волной в цилиндрическом волноводе, имеет вид [4]:

$$W = \frac{\pi k k_z a^2}{Z_0 \kappa^2} \frac{1}{2} [J_1^2(\kappa a) - J_0(\kappa a)J_2(\kappa a)] E_0^2, \quad (4)$$

где a — радиус отверстия для пролета пучка в СВЧ-системе. Считая, что $E_0 = \frac{U_{out}}{L}$, где L — длина резонатора и $W = \frac{U_{out}^2}{Z}$, выражение для импеданса лампы бегущей волны (ЛБВ) или клистрона может быть

записано в следующей форме:

$$Z = \frac{Z_0}{2\pi^2} \left(\frac{L}{a}\right)^2 \frac{\lambda^2}{S} \beta_f F(\kappa a), \quad (5)$$

где $F(\kappa a) = \frac{\kappa^2 a^2}{[J_1^2(\kappa a) - J_0(\kappa a)J_2(\kappa a)]}$, β_f — фазовая скорость волны, $Z_0 = 377 \Omega$. Величина $F(\kappa a)$ изменяется в диапазоне от 8 (при $\beta_f = 1$, как в случае с ЛБВ) до 20 (гладкий волновод или резонатор, как в случае клистрона).

Рассмотрим лампу бегущей волны. Для используемого в ней диафрагмированного волновода (замедляющей структуры) $\beta_f = \beta_e$, которая уже при небольших значениях γ стремится к единице. Отсюда, считая, что $\frac{L}{a} = 10$, $\beta_f = 1$, $F(\kappa a) = 8$, получаем

$$Z = 1.5 \cdot 10^4 \frac{\lambda^2}{S} \Omega. \quad (6)$$

Видно, что, например, для получения мощности на уровне $W = 10(\gamma - 1)^2 \text{ GW}$ требуется, чтобы $Z = 25 \Omega$, что возможно, если $\frac{S}{\lambda^2} = 600$.

Следовательно, в ЛБВ для получения высоких уровней мощности необходимо использовать короткий волновод и работать на высших модах, что и подтверждается экспериментально.

С этой точки зрения более интересным является клистрон. В случае использования больших токов в нем можно выбрать отношение $\frac{L}{a} \sim 0.25$. В этом случае при $\beta_f \cong 1.5$ и $F(\kappa a) = 20$ получаем

$$Z = 36 \frac{\lambda^2}{S} \Omega. \quad (7)$$

Следовательно, для получения такого же импеданса $Z = 25 \Omega$ достаточно, чтобы $\frac{S}{\lambda^2} = 1.4$. Это означает, что в релятивистских клистронах возможно получение достаточно больших мощностей при работе на основном виде колебаний.

Из экспериментальных данных известно, что импеданс магнетрона тоже примерно равен 25Ω . Это означает, что с помощью релятивистских магнетронов можно генерировать достаточно высокие мощности при выборе стандартных размеров анодного блока.

Оценим величину предельно допустимой СВЧ-мощности для виркатора. В [5] показано, что сопротивление виркатора может быть определено из выражения, связывающего плотность тока j и напряжение на зазоре U ; для диода сильноточного ускорителя

$$j = \frac{8 mc^3}{9 e} \frac{1}{\pi d^2} \frac{(\gamma - 1)^2}{\sqrt{\gamma^2 - 1}} F_1^2, \quad 1 \leq F_1 \leq \frac{3}{2}. \quad (8)$$

Учитывая, что $I = jS$, получаем

$$Z = 60\pi \cdot \frac{9 d^2}{8 S} \frac{1}{\beta} \frac{1}{F_1^2} \quad (9)$$

или, считая, что $\beta \rightarrow 1$,

$$Z = \frac{9}{16} Z_0 \frac{d^2}{S} \frac{1}{F_1^2} \approx 250 \frac{d^2}{S} \Omega. \quad (10)$$

Отсюда следует, что для получения той же самой мощности $W = 10(\gamma - 1)^2 \text{ GW}$ с помощью виркатора требуется $\frac{S}{d^2} = 10$.

Поскольку в виркаторах возможно получение $S \gg d^2$, отсюда следует, что в нем можно получать значительно большие уровни мощности.

Полученные данные позволяют правильно выбрать параметры того или иного релятивистского СВЧ-генератора, если главной задачей является повышение уровня генерируемой СВЧ-мощности.

Список литературы

- [1] *High-Power Microwave Sources* / Ed. V. Granatstein, I. Alexeff. Massachusetts: Artech House, 1987.
- [2] Диденко А.Н. // ДАН. 1997. 356. № 4. С. 470–471.
- [3] Гапонов А.В., Миллер М.А. // ЖЭТФ. 1958. Т. 34. № 1. С. 242–243.
- [4] Вальднер О.А., Власов А.Д., Шальнов А.В. Линейные ускорители. М.: Атомиздат, 1969.
- [5] Диденко А.Н., Зверев Б.В. СВЧ-энергетика. СПб.: Наука, 1995.