

ОДНОМОДОВЫЙ ЧЕРЕНКОВСКИЙ СВЧ ГЕНЕРАТОР С ПРОСТРАНСТВЕННО-РАЗВИТОЙ ГОФРИРОВАННОЙ ЭЛЕКТРОДИНАМИЧЕСКОЙ СИСТЕМОЙ

М.В. Кузелев, А.А. Рухадзе

Предложены конкретные черенковские генераторы СВЧ излучения с развитой электродинамической системой. Рассчитаны их параметры в условиях, когда излучение носит одномодовый характер.

Гофрированные электродинамические системы используют для создания СВЧ генераторов, работающих в режиме лампы обращенной волны (ЛОВ) или π -вида [1,2]. Для таких генераторов характерна близость длины излучаемой волны к поперечному размеру электродинамической системы. Однако в гофрированных волноводах возможно возбуждение и существенно более коротковолновых колебаний. Оно осуществляется в режиме лампы бегущей волны (ЛБВ), но только в условиях, когда генерация на низкой частоте в режиме ЛОВ по какой-либо причине не возникает. Расчету одномодового высокочастотного генератора посвящена настоящая работа.

Частоты возбуждаемых в гофрированной системе волн даются выражениями [3]:

$$\omega_{1,2} = \chi u \gamma^2 \left[1 \pm \frac{u}{c} \left(1 - \frac{k_{\perp n}^2 c^2}{\chi^2 u^2 \gamma^2} \right) \right], \quad (1)$$

где u — скорость электронного пучка; $\gamma = (1 - u^2/c^2)^{-1/2}$; $2\pi/\chi$ — период гофрировки; $k_{\perp n}$ — поперечные волновые числа волноводных мод Е-типа*. Генерация на низкой частоте ω_2 соответствует режиму ЛОВ-генератора, а генерация на высокой частоте — режиму ЛБВ-генератора.

Предположим, что выполнены следующие условия:

$$\chi u = k_{\perp 1} c, \quad (k_{\perp 1} = 2,4/R), \quad (2)$$

$$k_{\perp 1}^2 c^2 < \chi^2 u^2 \gamma^2 < k_{\perp 2}^2 c^2, \quad (k_{\perp 2} = 5,52/R), \quad (3)$$

где R — средний радиус гофрированного волновода. Тогда из (1) и (2) следует, что $\omega_2 = k_{\perp 1} c$, то есть в точности совпадает с частотой отсечки электродинамической системы. Другими словами, частота ω_2 попадает на верхнюю границу полосы непрозрачности волновода. Из общей теории [4] следует, что черенковская генерация на верхней границе полосы непрозрачности любой электродинамической системы невозможна. Таким образом, при выполнении (2) генерация на низкой частоте ω_2 в гофрированном волноводе подавлена. Что же касается неравенства (3), то оно, как это видно из (1), обеспечивает отсутствие возбуждения в волноводе второй радиальной моды E_{02} . Следовательно, если какими-то иными средствами удастся подавить возбуждение и первой несимметричной моды E_{11} ($k_{\perp 1} = 3,82/R$)**, то в условиях (2) и (3) в системе будет возбуждаться только одна мода с высокой частотой ω_1 . Тем самым имеется предпосылка для создания одномодового высокочастотного генератора на основной моде E_{01} . Такой генератор будет прост-

* Считая пучок замагниченным, исключаем возможность возбуждения колебаний Н-типа.

** Условия $k_{\perp 1}^2 c^2 < \chi^2 u^2 \gamma^2 < (3,82c/R)^2$ отсутствия возбуждения моды E_{11} накладывают серьезное ограничение на релятивизм пучка: $\gamma < 1,6$.

ранственно развитым, поскольку длина волны, соответствующая частоте ω_1 , оказывается существенно меньшей R .

Считая электронный пучок тонким трубчатым, приведем выражение для стартового тока возбуждения генератора на частоте ω_1 /3/:

$$J_{st} = 55 \frac{(h\chi)^{-2} \gamma^3 (u/c)^3 R^2 (v_1/\omega_1 L^3) \ln^3(3/|\kappa|)}{(1 - k_{\perp 1}^2 c^2/\chi^2 u^2 \gamma^2) I_0^2(\omega_1 r_b/u\gamma)/I_0^2(\omega_1 R/u\gamma)} \text{ кА}, \quad (4)$$

где $v_1 = (\omega_1 - \chi u) c^2/\omega_1 u$; r_b — радиус пучка; L — длина гофрированного резонатора; κ — коэффициент отражения волн от излучающего устройства; h — глубина гофрировки ($h \ll R$). В качестве излучающего устройства, эффективно отражающего волны в высокочастотной области, может быть использован так называемый брэгговский отражатель /5, 6/. Общий вид генератора показан на рис. 1, на котором приняты обозначения: $d = 2\pi/\chi$ — период гофрировки резонатора; L_u — длина брэгговского отражателя; d_u — период гофрировки отражателя.

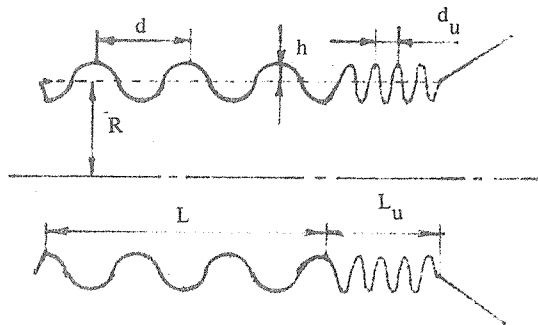


Рис. 1. Общий вид генератора.

Приведем основные расчетные формулы генератора, записанные через длину волны излучения $\lambda = 2\pi c/\omega_1$:

$$d = \beta \lambda \gamma^2 (1 + \beta^2), \quad R = 0,38 d/\beta,$$

$$J_{st} = \frac{8\gamma\beta^4}{(1 + \beta^2)^2} \left(\frac{R}{h}\right)^2 \left(\frac{R}{L}\right)^3 \exp\left(4,8\gamma \frac{1 + \beta^2}{\beta} \frac{h}{R}\right) \left[\ln\left(\frac{3}{|\kappa|}\right)\right]^3 \text{ кА}, \quad (5)$$

$$d_u = \frac{\lambda}{2} \frac{\gamma^2 (1 + \beta^2)}{[\gamma^4 (1 + \beta^2)^2 - 1]^{1/2}} \approx \frac{\lambda}{2}, \quad |\kappa| = \text{th}\left(\frac{2\pi h}{R} \frac{L_u}{\lambda}\right),$$

где $\beta = u/c$. При написании выражения для J_{st} мы положили $r_b = R - h$, имея целью возможное уменьшение J_{st} .

Конкретизируем формулы (5), для чего зададимся каким-либо значением γ . Следствием (3) с учетом (2) является неравенство $\gamma < 2,3$, поэтому положим $\gamma = 2$. При этом формулы (5) запишутся в виде:

$$d = 6\lambda, \quad R = 2,7\lambda, \quad d_u = \lambda/2,$$

$$|\kappa| = \text{th}(6,3hL_u/R\lambda), \quad (6)$$

$$J_{st} = 60\varphi(h/R) (\lambda/L)^3 \ln^3(3/|\kappa|) \text{ кА}.$$

Здесь $\varphi(h/R) = (R/h)^3 \exp(19h/R)$ — функция, достигающая минимума при $h/R \cong 0,1$. Этого значения h/R и будем в дальнейшем придерживаться. Если, кроме того, положить $L_u = \lambda$, то окажется, что $|\kappa| = 0,55$ (это довольно значительное отражение), а $J_{st} = 2 \cdot 10^5 (\lambda/L)^3 \text{ кА}$.

Таблица 1

Примеры генераторов со стартовым током $J_{st} = 1,6$ кА

Длина волны λ , см	d, см	R, см	h, см	d_u , см	L_u , см	L/ λ
3	18	8,1	0,8	1,5	3	50
0,8	4,8	2,2	0,22	0,4	0,8	50
0,1	0,6	0,27	0,03	0,05	0,1	50

В табл. 1 приведены три конкретных примера генераторов со стартовым током $J_{st} = 1,6$ кА.

При уменьшении длины резонатора L резко возрастает стартовый ток генератора. Так, при уменьшении L вдвое ($L = 25\lambda$), в рассмотренных выше примерах J_{st} возрастает до 13 кА*.

Следует заметить, что при нарушении соотношения (2) генератор начинает возбуждаться на низкой частоте ω_2 . Поэтому важно знать как точно должно выполняться равенство (2), т.е. какова допустимая неточность в определении скорости пучка u . Анализ показывает, что должно быть выполнено условие $|\Delta u/u| < 3\pi/k_{11}L \approx 4R/L$, что в случае разобранных выше примеров дает $|\Delta u/u| < 0,2$. Это неравенство не является жестким ограничением на точность в заданной скорости пучка.

В заключение приведем оценку для КПД генератора. Как показано в [3], КПД в стартовом режиме определяется величиной $\gamma^2 \lambda/L$ и в рассмотренных примерах составляет $8 \div 10\%$.

* В нашем конкретном случае ($\gamma = 2$, $r_b = R - h$, $\Delta \sim h$, где Δ — толщина пучка) предельный вакуумный ток резонаторов составляет 24 кА [7].

ЛИТЕРАТУРА

1. Ковалев Н. Ф., Петелин М. И. Сб. "Релятивистская высокочастотная электроника", под ред. А.В. Гапонова-Грехова, Горький, изд. ИПФ АН СССР, 1981, с. 62.
2. Александров А. Ф. и др. Там же, с. 145.
3. Богданкевич Л. С., Кузелев М. В., Рухадзе А. А. УФН, 133, 3 (1981).
4. Кузелев М. В., Поезд Е. Д., Рухадзе А. А. Краткие сообщения по физике ФИАН, № 12, 42 (1981).
5. Братман В. Л., Денисов Г. Г., Коровин С. Д. Сб. "Релятивистская высокочастотная электроника", под ред. А.В. Гапонова-Грехова, Горький, изд. ИПФ АН СССР, 1984, с. 119.
6. Виноградова М. Б., Руденко О. В., Сухоруков А. П. Теория волн. М., Наука, 1979.
7. Рухадзе А. А. и др. Физика сильноточных релятивистских электронных пучков. М., Атомиздат, 1980.

Институт общей физики АН СССР

Поступила в редакцию 26 февраля 1987 г.