

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ИЗЛУЧЕНИЯ ЭЛЕКТРОННЫХ СГУСТКОВ ВБЛИЗИ НЕОДНОРОДНОСТЕЙ

В. Б. Брагинский, Е. Р. Мустель

Приведены результаты исследования некоторых вариантов умножителей частоты, в которых используется „переходное“ излучение электронных сгустков вблизи неоднородностей.

Умножение частоты является одним из возможных методов, позволяющих освоить коротковолновую часть диапазона СВЧ (длины волн короче  $3 \div 4$  мм). Однако при использовании обычных в сантиметровом диапазоне методов умножения возникает целый ряд технических трудностей, связанных, в частности, с такими „малыми параметрами“, как зазор между сетками, если преобразование энергии гармоник электронного потока в электромагнитное излучение производится с помощью резонатора, или шага спирали (гребенки), если преобразование производится с помощью замедляющей системы.

В последнее время появились предложения использовать в диапазоне СВЧ излучение электронных сгустков вблизи неоднородностей [1,2] и переходное излучение [2,3,4].

Заметим, что эффективность устройств, использующих подобные методы генерации, можно характеризовать (в приближении заданных токов) величиной сопротивления излучения  $R_{\text{изл}} = \omega/I^2$ , где  $\omega$  — излучаемая мощность,  $I$  — амплитуда тока соответствующей частоты.

Непосредственное использование переходного излучения сравнительно мало эффективно. Если для обычных тороидальных резонаторов сопротивление излучения составляет  $10^2 \div 10^8$  ом при полосе 1%, то для переходного излучения при скорости электронов 0,1 с (т. е. энергии 3 кэВ) сопротивление излучения — 0,25 ом при практически неограниченной полосе.

Поэтому представляет интерес создание такого устройства для преобразования энергии электронного потока в энергию электромагнитного излучения, которое сохраняло, хотя бы частично, „простоту“ и широкополосность переходного излучения и обладало бы заметно большим сопротивлением излучения.

В настоящей работе приведены результаты исследований некоторых из возможных вариантов такого устройства. Измерения проводились на моделях в диапазонах  $\lambda \approx 3$  см и  $\lambda = 10$  см.

На рис. 1 изображена одна из подобных систем. На небольшой металлический диск, укрепленный на стержне, оседает электронный поток, который заранее промодулирован по скорости напряжением от генератора задающей частоты. Ускоряющее напряжение и размеры трубки подбирались таким образом, чтобы в момент оседания на диск амплитуда выбранной гармоники электронного потока была бы наибольшей. При оседании электронного потока возникло излучение типа переходного. Таким образом, с технической точки зрения такая система представляет собой электронный умножитель частоты. Производившиеся измерения сводились к определению интенсивности излучения и сопротивления излучения на частоте,

соответствующей одной из гармоник электронного потока. Измерения показали, что основная часть излученной энергии (около 80%) направлена вдоль провода с узкой конусообразной диаграммой направленности, около 10% излучения составляет поверхностная однопроводная волна, и примерно 10% излучается перпендикулярно стержню.

Необходимо отметить, что во всех испытанных лампах наблюдалась квадратичная зависимость мощности излучения от тока, так что сопротивление излучения  $R_{изл}$  полностью характеризовало систему.

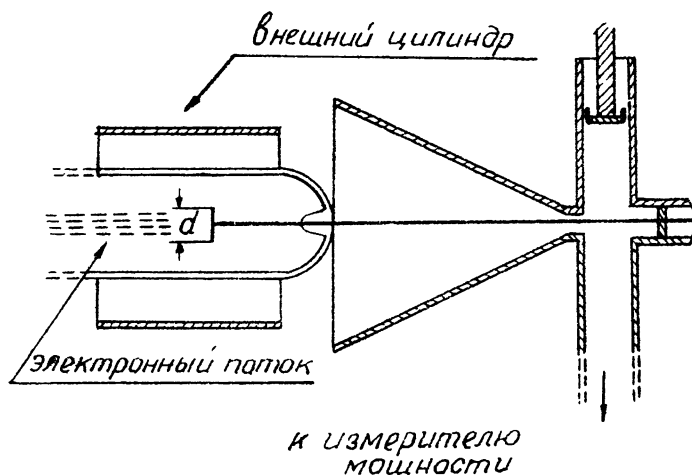


Рис. 1.

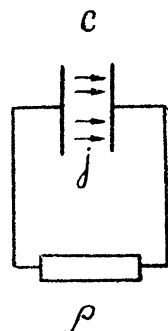


Рис. 2.

На таблице указаны величины  $R_{изл}$  и параметры некоторых из опробованных ламп. Значения  $R_{изл}$  относятся к мощности, измеренной с помощью конусообразного рупора, переходящего в стандартный волновод. Как видно из таблицы, величины измеренного сопротивления излучения больше, чем теоретическое значение для переходного излучения (0,25 ом при  $U_{уск} \approx 3кв$ ). Добавление внешнего цилиндра, коаксиального со стержнем, позволяет повысить сопротивление излучения в  $2 \div 2,5$  раза (см. таблицу и рис. 1).

Таблица 1

№№ ламп	$R_{изл}$ (ом)	$d$ (мм)	$2a$ (мм)	$\lambda$ (см)	номер гармоник	$U$ (кв)	$R_{изл}$ с цилиндром (ом)	$R_{изл}$ коаксиала (ом)
1	10,0	3,0	1,0	10	6	2,0	—	7,4
2	1,2	3,5	1,0	3	4	3,0	2,5—3	3,1
3	0,3	6,0	1,0	3	4	2,5	0,6—0,8	2,0
3	0,5	6,0	1,0	3	4	6,0	1—1,3	3,0
3	5,0	6,0	1,0	10	4	2,0	—	—
4	0,6	6,0	0,3	3	4	3,0	—	—
4	0,9	6,0	0,3	3	4	4,5	—	—
4	7,6	6,0	0,3	10	4	2,0	—	—

Увеличение сопротивления излучения у подобных систем по сравнению с „чистым“ переходным излучением качественно можно объяснить с помощью простой эквивалентной схемы, изображенной

на рис. 2. На этой схеме  $C$  — емкость диска,  $\rho_0$  — сопротивление (импеданс) провода, на котором закреплен диск\*:

$$\rho_0 \approx 60 \left| \ln \frac{\gamma ka}{2} \right|_2,$$

где  $\gamma$  — постоянная Эйлера,  $a$  — радиус провода,  $k = \frac{2\pi}{\lambda}$ . Сопротивление излучения в такой схеме, равное  $\left[ \frac{\sin \theta}{\theta} \right]^2 \frac{\rho_0}{1 + \rho_0^2 \omega^2 C^2}$ , учитывает лишь изменение потенциала диска при подходе и оседании электронных сгустков, но не учитывает переходного излучения, которое останется и при увеличении диаметра диска. Заметим, что за изменение потенциала диска ответственны конвекционные заряды, находящиеся в непосредственной близости от диска, на расстоянии порядка диаметра  $d$ . Величиной  $d$  определяется, таким образом, „пролетная зона“ (пролетный угол  $\theta$ ) при возбуждении провода.

Из соотношения для сопротивления излучения в приведенной эквивалентной схеме следует, что увеличение  $R_{\text{изл}}$  возможно при уменьшении размеров диска  $\left( \frac{\sin \theta}{\theta} \rightarrow 1, C \rightarrow 0 \right)$  и при уменьшении диаметра провода (увеличении  $\rho_0$ ). При размерах диска, близких к размерам зазора между сетками резонатора клистрона, рассчитанного на соответствующую длину волны, и при  $ka \approx 0,2$  сопротивление излучения — порядка  $10^2 \text{ ом}$ . Это хорошо видно на лампе № 1 ( $d = 3 \text{ мм}$ ,  $\lambda = 8,5 \text{ см}$ ), для которой  $R_{\text{изл}} = 10 \text{ ом}$ .

Сходные значения сопротивления излучения можно получить при точном решении задачи о возбуждении электронным потоком  $j = j_0 \delta(z) \delta(\theta) e^{j\omega t - k_0 r}$  коаксиального кабеля с диаметром внутреннего провода, равным диаметру диска (здесь  $\delta$  — дельта-функция).

В случае, когда диаметр оболочки коаксиала  $D \gg d$ , расчет дает следующее выражение для сопротивления излучения:

$$R_{\text{изл}} = \frac{1}{16\pi} \sqrt{\frac{\mu_0}{\epsilon_0}} \frac{1}{\ln \frac{D}{d}} \left\{ \left[ \text{si}(k_0 D) - \text{si}(k_0 d) \right]^2 + \left[ \text{ci}(k_0 D) - \text{ci}(k_0 d) \right]^2 \right\}.$$

На таблице 1 в крайнем правом столбце приведены значения сопротивления излучения, подсчитанные по приведенной формуле для коаксиала с диаметром провода, равным диаметру диска соответствующей лампы.

Таким образом, получение больших значений  $R_{\text{изл}}$  в таких системах достигается (так же как и в тороидальных резонаторах) за счет введения „технических малых параметров“ — диаметра диска и толщины провода. Однако приведенная система обладает двумя существенными достоинствами: а) в зависимости от технических возможностей можно просто варьировать величину сопротивления излучения, которая при больших размерах диска и стержня не будет ниже  $0,25 \text{ ом}$  ( $3 \text{ кв}$ ) для переходного излучения; б) система весьма широкополосна. О последнем свидетельствует тот факт, что в пределах точности наших измерений (20%) не было обнаружено изменение  $R_{\text{изл}}$  при изменении основной частоты в пределах 10% при работе в диапазоне  $\lambda = 3 \text{ см}$  и 30% — в диапазоне  $\lambda = 10 \text{ см}$ .

На рис. 3 изображен другой вид исследованных систем. В этих лампах электронный поток оседает на провод, перпендикулярный к направлению скорости электронов. Измерения показали, что и в

\* Это сопротивление аналогично встречающемуся в задачах о возбуждении поверхностных однопроводных волн [5].

этом случае излучение направлено вдоль провода и может быть собрано в коаксиальный кабель с помощью конусообразного рупора. На волне  $\lambda=10$  см при диаметре провода 1,5 мм  $U_{\text{уск}}=2,4$  кв, сопротивление излучения  $R_{\text{изл}}$  составляет 5 ом. Вместе с тем, при увеличении числа проводов, на которые оседает электронный поток, сопротивление излучения (по отношению к суммарной мощности) оставалось неизменным, а ток распределялся почти равномерно по всем проводам.

Если видоизменить конструкцию этой лампы, введя малый зазор при возбуждении провода (рис. 4), то сопротивление излучения заметно возрастает ( $R_{\text{изл}}=20$  ом при зазоре 4 мм,  $U_{\text{уск}}=1600$  в и  $\lambda=10$  см).

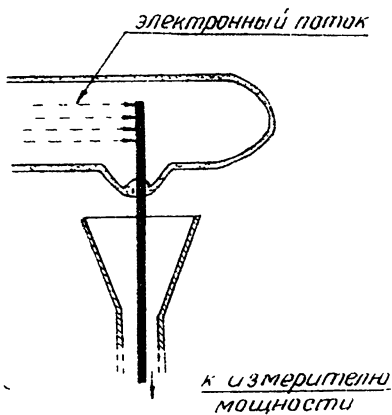


Рис. 3.

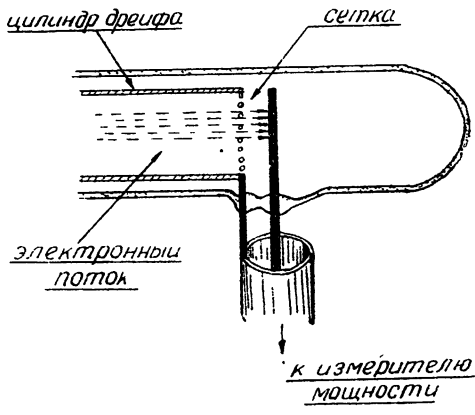


Рис. 4.

В заключение нужно отметить, что приведенные устройства не представляют собой готовых разработанных систем для преобразования энергии модулированного электронного потока в электромагнитное излучение. Цель этого сообщения—обратить внимание на возможность использования при конструкторских разработках широкополосных электронных умножителей подобных систем, которые, возможно, обладают преимуществами перед другими.

Авторы считают своим долгом выразить благодарность Р. В. Хохлову за помощь и советы в работе.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Г. А. Аскаръян, ЖЭТФ, 29, 3, 388 (1955).
2. В. Б. Брагинский, Радиотехника и электроника, 1, 2, 225 (1956).
3. В. Л. Гинзбург и И. М. Франк, ЖЭТФ, 16, 1, 15 (1946).
4. Г. А. Аскаръян, ЖЭТФ, 30, 3, (1956).
5. В. В. Владимировский, Изв. АН СССР, сер. физ., 8, 3, 139 (1944).

Московский государственный  
университет

Поступила в редакцию  
8 января 1958 г.