

**МНОВОЛНОВЫЙ РЕЗОНАНСНЫЙ КЛИНОТРОН МИЛЛИМЕТРОВОГО ДИАПАЗОНА**

Б. П. Ефимов

*Институт радиопластики и электроники им. А. Я. Усикова, НАН Украины  
12, ул. Ак. Проскуры, Харьков, 61085, Украина  
E-mail: jean@ire.kharkov.ua*

Описаны физические принципы построения вакуумных источников электромагнитных колебаний непрерывного действия, излучающие СВЧ энергию одновременно на нескольких несущих частотах в миллиметровом диапазоне. Рассмотрены вопросы согласования генератора с нагрузкой, управления уровнем выходной мощности и частотой, расчёта дисперсионных зависимостей и использования резонансных эффектов в периодических структурах, а также фокусировки электронных пучков в неоднородном магнитном поле. Приведены частотные характеристики и выходные параметры приборов. Ил. 14. Табл. 1. Библиогр.: 11 назв.

**Ключевые слова:** многоволновый клинотрон, миллиметровый диапазон, масштабное моделирование.

Диагностические методы исследования свойств плазмы в термоядерных установках типа "Токомак", "Огра", "Ураган" потребовали создания новых источников электромагнитных колебаний в миллиметровом диапазоне радиоволн – генераторов, излучающих СВЧ энергию на нескольких несущих частотах. В 60-х годах прошлого века для получения более достоверной информации о свойствах плазмы был предложен новый метод определения распределения концентрации электронов в плазме по изменению фазовых сдвигов волны на нескольких несущих частотах [1-2]. Данная методика была испытана на установках для диагностики плазмы "Альфа" и "Малахит", в которых в качестве генераторов использовались несколько магнетронных генераторов, работающих от отдельных блоков питания. Локализация СВЧ энергии в одном луче достигалась использованием волноводного соединительного устройства и общей рупорной антенны.

Преимущества многолучевой диагностики были реализованы в полной мере с того момента, когда была высказана идея о многоволновом клинотроне [3], разработанном в ИРЭ АН УССР [4]. Первые образцы таких генераторов с разделительным устройством на полиэтиленовых волноводах, излучающие СВЧ энергию на длинах волн 16-8-4-2, 16-8-4, 8-4-2, 8-4 мм использовались в Институте атомной энергии им. И. В. Курчатова (ИАЭ г. Москва) и показали положительные результаты.

**1. Методы построения многоволновых генераторов.** Основными требованиями, предъявляемыми к многоволновому зондированию плазмы, являются: примерно одинаковый уровень СВЧ мощности на каждой длине волны; разнос несущих частот в миллиметровом диапазоне порядка октавы; излучение СВЧ энергии в непрерывном режиме; возможность безынерционной перестройки частоты колебаний и мощности в каждом из диапазонов. Кроме этого, СВЧ генераторы и аппаратура, их обеспечивающая, должны

иметь малое энергопотребление, простоту в управлении и небольшие показатели габаритов и массы. Для создания такого генератора было решено возбудить одним электронным потоком одновременно поля в нескольких периодических структурах, предназначенных для работы в четырех точках миллиметрового диапазона, различающихся по длине волны в октаву.

Предполагалось, что при создании генератора можно использовать метод масштабного моделирования, согласно которому, задавая ускоряющее напряжение  $U$  постоянным для всех диапазонов, размеры резонаторов периодических структур и период структуры должны уменьшаться пропорционально длине генерируемой волны  $\lambda$ . Однако основные принципы метода масштабного моделирования для решения поставленной задачи оказались неприемлемыми и от них пришлось отказаться. Так для обеспечения необходимой жесткости фокусировки пучка согласно принципу масштабного моделирования магнитное поле необходимо было повышать обратно пропорционально длине волны. Для применения единого (общего) магнитного поля для всех периодических структур решено было обеспечить необходимое качество электронного потока для самых коротковолновых колебаний генератора, подразумевая, что в более длинноволновых диапазонах жесткость фокусировки пучка будет обеспечена с запасом.

Совсем неприменимыми в нашем случае оказались принципы масштабного моделирования относительно геометрических размеров электронного пучка. Уменьшение поперечного сечения пучка согласно этому методу требовало повышения плотности тока в пучке пропорционально даже не квадрату, а кубу генерируемой длины волны. Это было одним из основных препятствий на пути создания многоволнового генератора. Для преодоления этого препятствия было решено использовать сравнительно «толстый» пучок, так что относительная его толщина возрастала при

генерации более коротких волн. А для повышения энергообмена электронного потока с полями периодических структур решено было в полной мере использовать достоинства клинотронного эффекта и его модификацию - работу клинотрона в неоднородном фокусирующем магнитном поле. Обращено также внимание на необходимость использования для этих целей отражений от концов периодических структур, позволявших перейти к резонансному возбуждению клинотронов. Кроме этого для обеспечения примерно одинакового уровня мощности на всех генерируемых длинах волн (в нарушение принципа масштабного моделирования) решено было увеличивать ширину периодических структур по мере перехода к более коротким волнам. Преследуя эти же цели, решено было правильно определить место расположения той или другой периодической структуры относительно оси электронного пучка.

Были попытки реализовать последовательно все три представленные на рис. 1 варианта многоволновых генераторов.

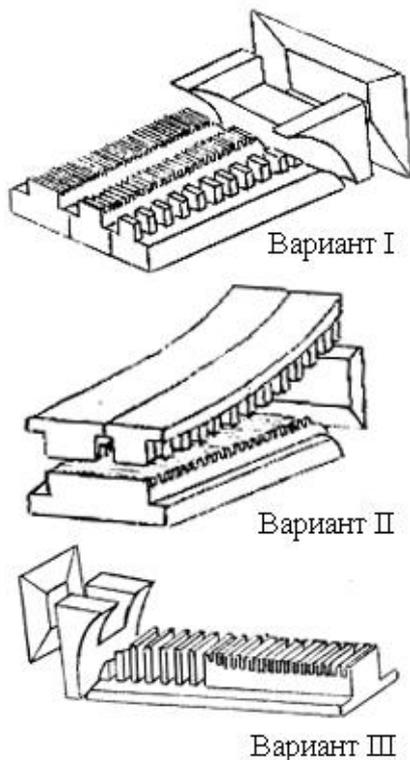


Рис. 1. Конструктивные варианты многоволновых генераторов миллиметрового диапазона

Тщательный анализ характеристик экспериментальных макетов показал, что по ряду параметров предпочтение должно быть отдано первому варианту. Основными недостатками второго и третьего вариантов являются значительное несовпадение максимумов выходных мощностей от угла наклона электронного пучка к замедляю-

щим системам, сильное слоение электронного потока из-за ионной бомбардировки катода пушки и сложная технология изготовления приборов. Поэтому в дальнейшем будем рассматривать результаты исследований генераторов на основе разработок первого варианта.

Опыт разработки одночастотных генераторов показал, что с точки зрения улучшения энергетических параметров приборов и его выходных характеристик необходимо максимально использовать резонансные свойства периодических структур и фокусировку электронных пучков в неоднородном магнитном поле.

**2. Расчёт дисперсии гребенчатых периодических структур.** Для расчёта дисперсии на начальном этапе использовались приближённые формулы, полученные электродинамическим методом частичных областей в предположении, что электрическое поле на раскрыве щели постоянно [5]. При больших замедлениях и достаточно толстых ламелях эти формулы удовлетворительно описывают дисперсию системы. В последующем в ИРЭ АН УССР был разработан более точный метод расчёта двумерной "гребёнки", основанный на использовании функции Грина для уравнения Лапласа, учитывающий особенности поля на краях ламелей "гребёнки" [6,7]. Следует отметить, что формулы для расчёта дисперсии, полученные по этому методу, оказались не более сложными, чем в приближении "постоянного поля" на щели резонатора.

Рассчитываем параметры гребенчатых замедляющих систем генератора с использованием точных "двумерных" дисперсионных уравнений работы [7]. Для этого выберем один из диапазонов многоволнового генератора, например 2-мм. Определим шаг  $d$  гребёнки и глубину резонатора  $h$  для обеспечения генерации колебаний с длиной волны  $\lambda_0$  при ускоряющем напряжении  $U_0$  на "-1" пространственной гармонике на оптимальном виде колебаний по выходной мощности ("вид" задаётся фазовым сдвигом волны на период структуры  $\varphi$ ).

В приборах типа "О", если выполняется условие синхронизма, то шаг гребёнки  $d$  для "-1" гармоники вычисляется по формуле

$$d = \lambda_0 \frac{\sqrt{U_0}}{1010} \left(2 - \frac{\varphi}{\pi}\right). \quad (1)$$

При расчёте шага нарезки по формуле (1) необходимо знать  $\varphi_{opt}$ . Многочисленные экспериментальные исследования показывают, что при использовании "гребёнок" с шириной щелей примерно равной половине шага нарезки режим максимальной мощности соответствует фазовым сдвигам  $(0,5 - 0,6)\pi$ .

$$h = \frac{\lambda_0}{2\pi} \operatorname{arctg} \left\{ \frac{l}{\lambda_0} \left[ \frac{1}{b} - \varphi'(b) - f(\theta) - \frac{2}{b} \frac{1}{1-p} \frac{1}{\left[ \frac{a+b+(b-a)e^{-G}}{b-a+(a+b)e^{-G}} \right]} \right] \right\}, \quad (2)$$

где

$$b = \frac{\varphi}{2\pi}; \quad \theta = \frac{1}{d}; \quad a = \sqrt{b^2 - \left(\frac{D}{\lambda}\right)^2};$$

$$\nu = \frac{d}{\lambda} \theta \operatorname{tg} \frac{2\pi h}{\lambda}; \quad G = 4\pi \frac{g}{d} a;$$

$$p = \left[ (1-\theta)^{1-\theta} (1+\theta)^{1+\theta} \right]^{-2b};$$

$$\varphi'(b) = 3 - \frac{2}{1-b^2} - \frac{4}{4-b^2} - 0,158b^2;$$

$$f(\theta) = 2 \ln(4\theta) + \frac{1-\theta}{\theta} \ln(1-\theta) - \frac{1+\theta}{\theta} \ln(1+\theta).$$

По заданным и найденным геометрическим параметрам "гребёнки"  $d, h, l$  и  $A$  с помощью уравнения (2) рассчитывалась вся дисперсионная кривая  $\lambda(U)$ . При этом дисперсионная кривая должна проходить через заданную точку  $(U_0, \lambda_0)$ , обеспечивая режим максимальной мощности при  $\varphi_{opt}$ . В качестве примера на рис. 2 приведены кривые перестройки генератора, рассчитанные на ЭВМ М-222.

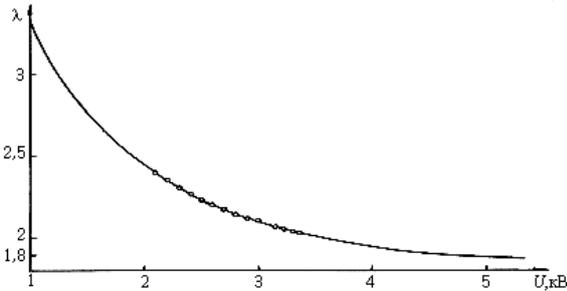


Рис. 2. Расчётная дисперсионная кривая для идеализированной двумерной "гребёнки" и экспериментальные точки для лампы 2-мм диапазона.

Аналогичным образом рассчитывались параметры "гребёнок" в других диапазонах многоволнового генератора. При этом учитывалось одно обстоятельство. Режим максимальной мощности в миллиметровом диапазоне зависит от  $\varphi_{opt}$ , который для диапазона 8 мм составляет примерно  $0,5\pi$ , для  $\lambda \approx 2$  мм -  $\varphi_{opt} = 0,3\pi$ .

Для расчёта глубины резонатора  $h$  задаётся одновременно расстоянием до экрана  $g$  над периодической структурой. Оно обычно пример-

но равно толщине используемого электронного пучка или несколько его превышает. Ширину  $l$  щели резонатора выбираем примерно равной половине шага нарезки  $d$  гребенчатой периодической структуры. Для расчёта глубины резонатора использовали асимптотически точное уравнение работы [6], полученное для расчёта дисперсии двумерной "гребёнки" с экраном.

Необходимо отметить, что, решая задачу определения геометрических параметров "гребёнки" для заданного диапазона частот, имелось ввиду существование точных методов расчёта только для идеализированной двумерной "гребёнки", когда электромагнитные поля не изменяются поперёк системы. Реальные трёхмерные системы строго не рассчитывались. Однако опыт показал существование области значений параметров реальной "гребёнки", когда некоторые типы колебаний могут достаточно точно рассчитываться по формулам, полученным для двумерной системы. Это объясняется тем, что на таких типах колебаний электромагнитные поля в реальной системе действительно слабо меняются поперёк системы и таким образом оказываются выполненными условия, принятые для двумерной модели.

**3. Обоснование длин периодических структур и веса магнитной системы.** В приборах типа "О", использующих нежёсткофокусированные электронные потоки, формируемые асимметричными диодными пушками. Большое влияние на эффективность взаимодействия и соответственно на выходные характеристики и массогабаритные показатели приборов оказывают длины периодических структур [8]. Опыт проектирования электронно-вакуумных приборов миллиметрового диапазона, работающих в постоянных магнитах подковообразной формы, указывает на то, что варьируя длину пространства взаимодействия и величину магнитного поля, одновременно удаётся найти минимальное значение пускового тока в зависимости от зазора между полюсами магнита, если в качестве параметра взять магнитную массу. Для этого запишем систему уравнений для простой магнитной цепи с учётом рассеивания магнитного потока [9]

$$\begin{aligned} FB_b S_b &= B_m S_m, \\ fB_b l_b &= H_m l_m. \end{aligned} \quad (3)$$

Отсюда можно получить выражение для объёма массы используемого материала магнита

$$V_m = \frac{FfB_b^2V_b}{B_mH_m} \quad (4)$$

Здесь  $B_b$  и  $B_m$  – магнитная индукция в воздушном зазоре и магните соответственно;  $H_b$  и  $H_m$  – напряжённость магнитного поля в воздушном зазоре и магните;  $S_b$  и  $S_m$  – площадь поперечного сечения воздушного зазора и магнита;  $l_b$  и  $l_m$  – длина магнитопровода в воздушном зазоре и магните;  $V_b = S_b l_b$  и  $V_m = S_m l_m$  – объём воздушного зазора и магнитной массы;  $F$  и  $f$  – коэффициенты рассеяния и потерь.

Пусковой ток генератора ( $I_{\text{пуск}}$ ) для нежесткофокусированного потока толщиной  $a_0$  определяется длиной замедляющей системы и величиной напряжённости пускового магнитного поля ( $H_{\text{пуск}}$ )

$$I_{\text{пуск}} = \frac{A}{l^3} e^{\frac{B}{H_{\text{пуск}}}}, \quad (5)$$

где  $A = \frac{0,124U}{R_0} \Lambda^3$ ;  $B = \frac{45450\pi a_0}{\lambda c}$ .

Здесь  $c$  – зазор анод-катод;  $R$  – сопротивление связи;  $\Lambda$  – замедленная длина волны.

Если допустить, что длина воздушного зазора магнита равна длине замедляющей системы, то из уравнений (4) и (5) можно определить  $l_{\text{opt}}$ . Для практически важных случаев уравнение для магнитной системы (4) можно упростить, полагая коэффициент потерь  $f$  равным 1,35, а коэффициент рассеяния  $F = R_\epsilon l_b$  прямо пропорционален длине воздушного зазора и его длина мала по отношению к длине магнита  $l_m$ . Тогда, учитывая, что для воздушного зазора  $H_b = B_b$ , выражение (4) примет вид

$$H_b = \frac{\sqrt{\frac{B_m H_m V_m}{1,35 R_\epsilon S_b}}}{l_b}, \quad (6)$$

где  $R_\epsilon$  – форма магнита.

Из уравнений (5) и (6) получим зависимость пускового тока генератора от величины воздушного зазора магнита и длины системы при условии, что  $l_m = l$

$$I_{\text{пуск}} = \frac{A}{l^3} e^{Dl} = \left( \frac{0,124U}{R_0 l^3} \right) e^{Dl}, \quad (7)$$

где  $D = \frac{B}{\sqrt{\frac{B_m H_m V_m}{1,35 R_\epsilon S_b}}}$ .

На рис. 3 показаны расчётные кривые зависимости  $I_{\text{пуск}} = f(l)$  для нескольких значений объёма магнитной массы.

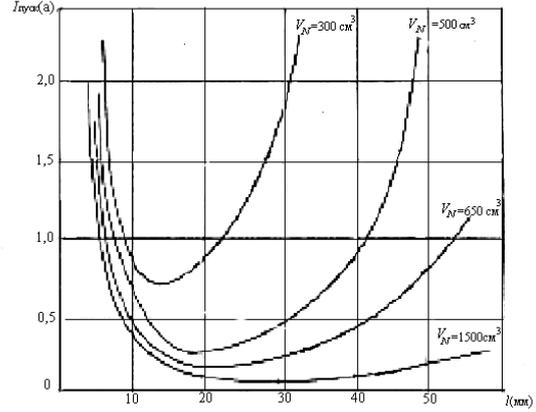


Рис. 3. Зависимость пускового тока от длины прибора для различных магнитных масс

Предполагалось, что для расчёта выбран материал альнико-П-Н ( $B_m H_m = 2,1 \cdot 10^6 \text{ Гс} \cdot \text{э}$ ), форма магнита  $R_\epsilon = 6$  и поперечное сечение полюсных наконечников  $S_h = 7 \text{ см}^2$ . При расчёте учтены электрические режимы генератора 8-мм диапазона и параметры его пушки:  $U = 2,5 \text{ кВ}$ ;  $a_0 = 0,4 \text{ мм}$ ;  $C = 1 \text{ мм}$ .

Из рис. 3 видно, что чем меньше масса магнитной системы, тем более резко проявляется минимум пускового тока на кривых его зависимости от длины периодической структуры. Этому минимуму соответствует  $l_{\text{opt}}$ . Следует заметить, что для всех оптимальных длин генератора минимум пускового тока определяется диапазоном работы генератора (т. е.  $\lambda$ ) и параметрами диодной пушки  $\left( \frac{a_0}{c} \right)$ . В данном случае, как видно из графика, оптимальная длина гребёнки для  $\lambda = 8 \text{ мм}$  составляет  $\sim 15 \text{ мм}$  [8].

С укорочением длины волны в соответствии с формулой (7) минимум пускового тока от длины структуры смещается вправо обратно пропорционально  $\lambda$ . Например, для диапазона 2 мм оптимальная длина будет в четыре раза больше, чем на длине волны 8 мм, т. е. 60 мм. Для многоволновых генераторов невозможно выдержать оптимальные длины на всех диапазонах одновременно, поэтому выбираем среднее значение длин от крайних диапазонов, т. е. между 15 и 60 мм.

Для разрабатываемых генераторов эта длина была выбрана 35 мм.

**4. Использование неоднородного фокусирующего магнитного поля в многоволновых генераторах.** Повышение эффективности взаимодействия электронного пучка с полем волны в неоднородном фокусирующем магнитном поле наблюдается, как правило, в коротковолновой части миллиметрового димапазона и объясняется увеличением длины пролёта электрона при наличии в пучке "обеднённого" слоя [8]. Эта закономерность впервые привлекла внимание разработчиков ИРЭ АН УССР (г. Харьков) и в дальнейшем изучалась в работах НИИМФ СГУ (г. Саратов).

Необходимость смещения генератора миллиметрового диапазона в область неоднородного магнитного поля диктуется соображениями снижения пускового тока и соответственно увеличения выходной мощности прибора. Величина неоднородности магнитного поля весьма незначительна и составляет  $\Delta B/B = 0,0002$ , измерить которую с достаточной точностью практически невозможно. Поэтому в экспериментах величину неоднородности косвенно оценивают по величине смещения прибора в миллиметрах от оси магнита. Измерение угла наклона производилось с точностью ~2-3 угловых минуты.

На рис. 4 представлено схематическое изображение траекторий электронов в пучке, сформированном неоднородным магнитным полем в предположении, что средняя линия траектории каждого электрона повторяет силовую линию напряжённости магнитного поля; криволинейные силовые линии магнитного поля эквидистантны в силу малости толщины электронного потока; электронный пучок представляет собой трубку тока с параллельными границами; угол падения электронного потока на периодическую структуру меняется вдоль её длины от  $\varphi_{\max}$  для нижней границы пучка до  $\varphi_{\min}$  для верхней границы пучка; касательная к траектории каждого отдельного электрона меняется при его перемещении в пространстве взаимодействия.

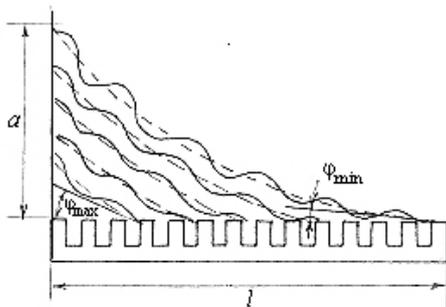


Рис. 4. Схематическое изображение траекторий электронов в пучке, сфокусированных неоднородным магнитным полем

Поскольку  $\varphi_{\max}$  и  $\varphi_{\min}$  малы, электронный поток сложной формы, сформированный неоднородным магнитным полем, можно заменить эквивалентным ему потоком, сформированным однородным полем с углом наклона  $\varphi = \varphi_{\text{ср}}$  ( $\varphi_{\text{ср}}$  - средний угол наклона хорд, соединяющий начало и конец криволинейных траекторий электронов в пространстве взаимодействия). Таким образом, неоднородное магнитное поле будет характеризоваться углом наклона к оси магнита  $\theta$  (см. рис. 5).

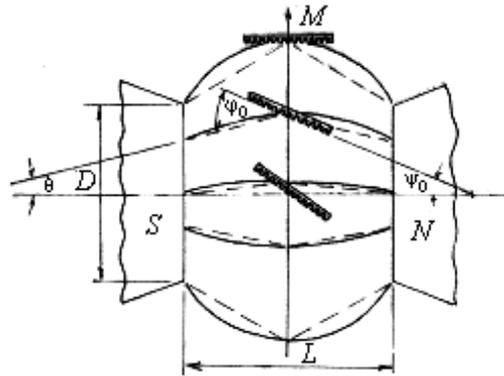


Рис. 5. Изменение положения периодической структуры в области неоднородного магнитного поля

Увеличение кривизны линий магнитного поля приводит к росту угла  $\theta$ . Величина неоднородности поля зависит от соотношения  $\frac{D}{L}$  (где

$D$  - диаметр полюсных наконечников;  $L$  - величина магнитного зазора) и смещения прибора от оси магнита ( $M$ ) в миллиметрах.

Исходя из характера изменения  $\theta(M)$  и  $\psi$  - угла наклона замедляющей системы к оси магнита, можно предположить, что оптимальный угол наклона хорды к замедляющей системе  $\varphi_0$  остаётся неизменным при перемещении прибора в зазоре между полюсами, т. е.

$$\varphi_{0\text{ср}} = \psi_0 + \theta(M) = \varphi_0, \quad (8)$$

где  $\varphi_0$  - оптимальный угол наклона электронного потока к поверхности замедляющей системы в однородном магнитном поле (клинотронный эффект). Так как  $\varphi_0$  определяется толщиной потока  $\alpha$  и длиной системы  $l$  (без учёта нелинейного взаимодействия), т. е.  $\varphi_0 = \arctg(\alpha/l)$ , то следовательно

$$\psi_0 \left( \frac{\alpha}{l}, \frac{D}{L}, M \right) = \varphi_{0\text{ср}} \left( \frac{\alpha}{l} \right) - \theta \left( \frac{D}{L}, M \right). \quad (9)$$

Если  $\theta$  зависит от неоднородности магнитного поля, характеризуемой отношением  $\left(\frac{D}{L}\right)$  и величиной ( $M$ ), то измеряемый в эксперименте угол  $\psi$  определяется как неоднородностью магнитного поля, так и геометрией пространства взаимодействия. Повышение эффективности взаимодействия в неоднородном магнитном поле особенно чётко проявляется при укорочении длины волны. В миллиметровом диапазоне генератор, помещённый по центру полюсных наконечников, как правило, не возбуждается. Генерация достигается смещением прибора в неоднородное магнитное поле. Для примера на рис. 6 показана область работы генератора на трёх длинах волн: 16, 8 и 4 мм с изменением мощности  $P$  от  $\psi$  при его смещении в область неоднородного поля ( $M = var$ ).

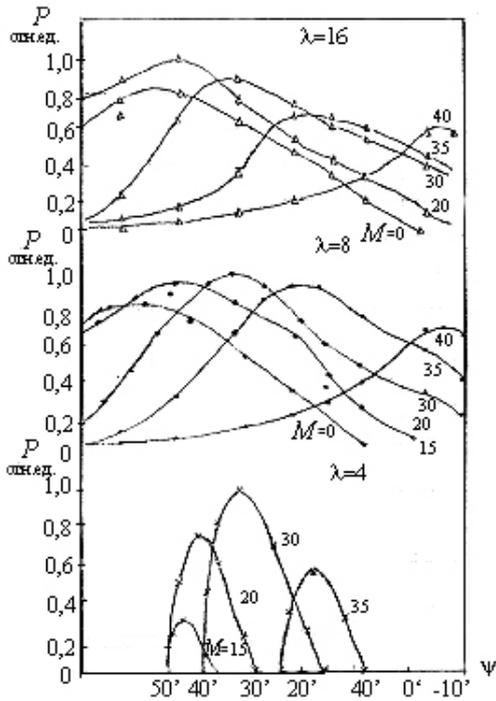


Рис. 6. Изменение областей работы генератора в неоднородном магнитном поле для трёх рабочих частот

Измерения проведены при напряжённости магнитного поля  $H = 3000$  Э, при постоянном токе в пучке 65 мА и ускоряющем напряжении 1,95 кВ. Величина неоднородности, требуемая для возбуждения генератора, находится в пределах 15 мм  $\leq M \leq 35$  мм при  $\frac{D}{L} = 1,85$ . Диапазон углов  $\psi$ , при которых возможна генерация, имеет максимальную ширину при значениях  $M$  близких к оптимальному значению  $M$  по мощности.

Из рис. 6 видно, что с укорочением длины волны диапазон работы генератора сужается

как по  $\psi$ , так и по  $M$ . Причём с увеличением неоднородности магнитного поля наблюдается смещение области генерации к меньшим  $\psi$ . В диапазоне волн 16 и 8 мм удаётся возбудить генератор даже при значениях  $\psi \leq 0$ . Максимумы мощностей на всех диапазонах наблюдаются при одинаковых  $\psi$  для фиксированных значений  $M$ , т. е.  $\psi_0 = (M)$  не зависит от частоты, а определяется характером неоднородного магнитного поля.

На рис. 7 представлена зависимость  $\psi_0 = (M)$  для трёх указанных диапазонов при  $a/l = 0,0147$ . При  $M = 40$  мм  $\psi_0 = 0$ , т. е. замедляющая система становится параллельной оси магнита. При этом  $\theta = \varphi_0$ , что следует из уравнения (9). Повышение эффективности взаимодействия в неоднородном магнитном поле проявляется также в снижении пускового тока. Результаты измерений представлены на рис. 8. При снятии этих зависимостей выбиралось минимальное значение пускового тока по угловой координате, т. е. значение  $I_{пуск}$  измерялось при  $\psi_0$ .

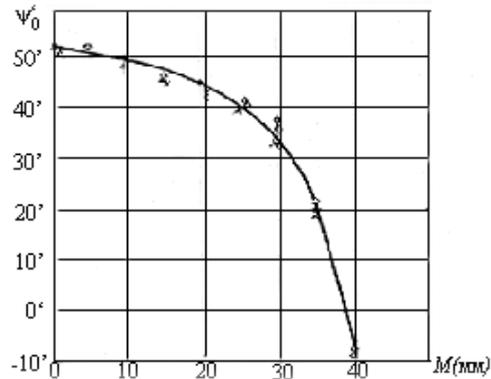


Рис. 7. Зависимость угла наклона пучка от смещения в область неоднородного магнитного поля для трёх диапазонов длин волн: о - 16; х - 8; Δ - 4 мм

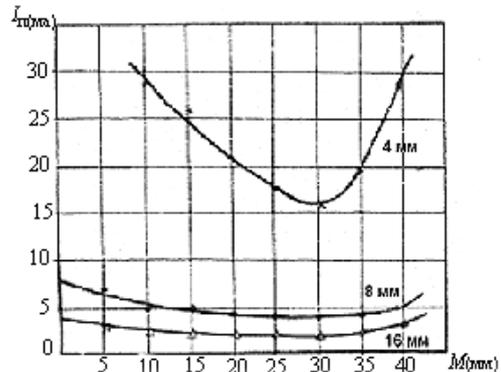


Рис. 8. Зависимость пускового тока для трех длин волн от смещения генератора в область неоднородного магнитного поля

Известно, что при  $M = M_{\text{опт}}$  пусковой ток достигает минимального значения. Отношение пусковых токов для  $M=0$  и  $M = M_{\text{опт}}$  примерно равно 2 на всех трёх диапазонах. Поскольку на более коротких волнах абсолютное значение пускового тока больше чем на длинных, а отношение  $I_{\text{пуск}}(M=0)/I_{\text{пуск}}(M = M_{\text{опт}})$  остаётся тем же самым, то минимум на коротких волнах проявляется более чётко. Но его положение не зависит от длины волны и для постоянных величин  $a/l$  и  $\frac{D}{L}M_{\text{опт}} = 30$  мин.

С целью получения зависимости  $M_{\text{опт}}$  от степени неоднородности магнитного поля изучался характер изменения выходной мощности от величины смещения  $M$  для нескольких значений  $\frac{D}{L}$  при изменении зазора  $L$  между полюсами магнита. Опыты проводились на трёх длинах волн. Величина магнитного поля поддерживалась постоянной и равной 2 кЭ. Результаты измерений, выполненные в 4- и 8-мм диапазонах, приведены на рис. 9. Кривые на волне 16 мм не имеют чётко выраженных особенностей и поэтому на рисунке не показаны. Увеличение магнитного зазора ( $L$ ) приводит к более сильному проявлению влияния неоднородности магнитного поля, т. е. угол  $\theta$  от  $M$  меняется более быстро, а ширина области генерации по  $M$  сужается.

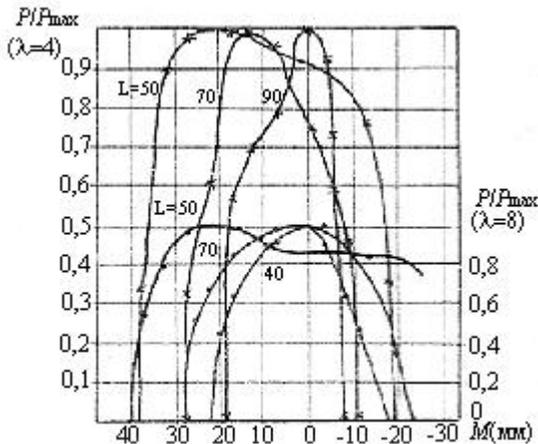


Рис. 9. Зависимость выходной мощности от степени неоднородности фокусирующего магнитного поля для двух рабочих частот генератора

При изучении работы многоволнового генератора особое внимание уделяется влиянию тока на угловые зависимости, в частности, на положение максимумов выходной мощности. В связи с этим представляло интерес выяснить влияние тока в пучке на положение  $M_{\text{опт}}$ . Соответствующие

зависимости, где по осям отложены СВЧ мощность в относительных единицах и смещение  $M$  в миллиметрах в неоднородном магнитном поле, представлены на рис. 10. Измерения проведены в 8-мм диапазоне волн при  $H = 3500$  Э и токе в пучке 50 мА. Превышение рабочего тока над пусковым в 2 - 3 раза, как видно из рисунка, не приводит к изменениям оптимального положения генератора в неоднородном магнитном поле, а лишь расширяет область возбуждения генератора в основном в сторону изменения  $M$ , меньших  $M_{\text{опт}}$ . Максимальная эффективность взаимодействия на всех длинах волн достигается при одинаковых  $M$ .

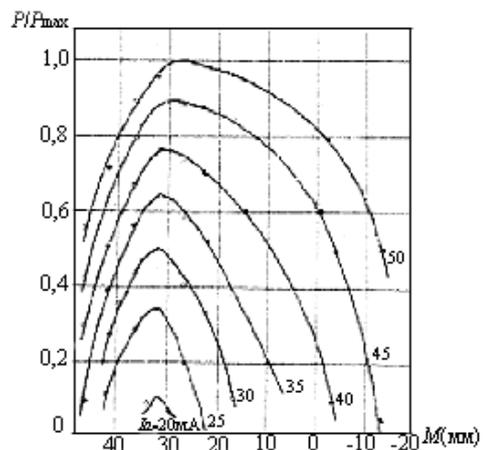


Рис. 10. Зависимость выходной мощности от степени неоднородности магнитного поля для разных токов в пучке

Для иллюстрации работы генератора в неоднородном магнитном поле на рис. 11 в трёхмерных координатах  $P-M-\psi$  приведены области генерирования одного из приборов, возбуждаемых на волне 4 мм, из которых видно изменение выходной мощности в зависимости от угла наклона пучка и степени неоднородности магнитного поля.

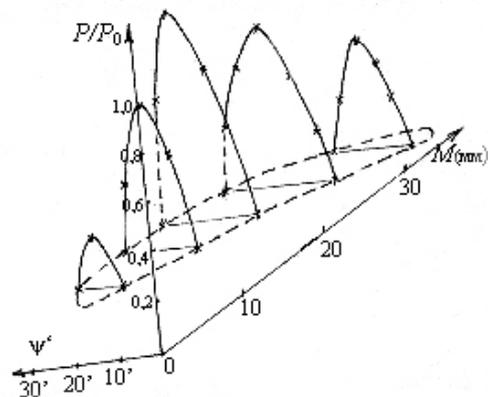


Рис. 11. Область работы генератора 4-мм диапазона при его смещении в область неоднородного магнитного поля

**5. Влияние отражений на характеристики многоволновых генераторов.** При одновременном возбуждении током пучка нескольких гребёнок существует малая вероятность совпадения максимумов СВЧ мощностей на всех несущих частотах в миллиметровом диапазоне из-за имеющихся отражений в тракте. Поэтому создание генераторов, работающих на большом числе рабочих частот, уменьшает вероятность такого совпадения рабочих точек, что обуславливает малый выход многоволновых приборов, удовлетворяющих требованию непрерывности генерирования.

Однако известно, что значительные отражения приводят к ряду положительных явлений в генераторе, заключающихся в снижении пускового тока, повышении мощности и КПД, а также повышении стабильности частоты [8]. С этой точки зрения использование больших отражений на каждой волне в многоволновом генераторе полезно. Превращение многоволновых генераторов в резонансные позволяет зафиксировать разрывы в частотных характеристиках в строго определённых местах, подчиняющихся фазовым условиям генерации на каждой волне. Это упрощает задачу создания таких приборов, так как исключает возможность появления произвольных разрывов в частотных и пусковых характеристиках генераторов.

Резонансность на всех излучаемых волнах достигалась рассогласованием периодических структур с выходным волноводом. На практике это обеспечивалось путём уменьшения радиуса скругления выходных концов всех гребёнок. На коэффициент отражения со стороны пушечного конца лампы оказывает большое влияние размер анодного отверстия (размер  $-b$ ). Как правило, с широкими ленточными пучками анодное отверстие разделяют перегородками с целью сделать его закритическим для генерируемой волны. В резонансных лампах требования к подбору величины анодного отверстия становятся ещё более жёсткими. Это связано с тем, что с увеличением ширины анодного отверстия уменьшается коэффициент отражения от пушечного конца прибора. Проведенные измерения в 8-мм диапазоне представлены на рис. 12, где по осям отложены КСВ и длина волны.

Кривая 1 снята для ширины анодного отверстия 2 мм, кривая 2 - для 4 мм, кривая 3 - для 6 мм. Видно, что КСВ выхода быстро уменьшается при определённой длине волны с увеличением анодного отверстия. Характер изменения КСВ от  $b$  виден на рис. 13. Кривые 1 и 2 для длин волн 8,4 и 8,15 мм соответственно. Там же приведена зависимость КСВ от  $b$  для 4-мм диапазона (кривые 3 и 4 для длин волн 4,24 и 4,23 мм).

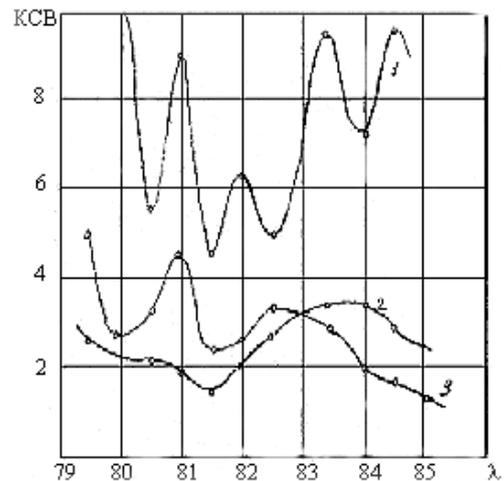


Рис. 12. Зависимость КСВ от  $\lambda$  для разной ширины анодного отверстия  $b$ . Кривые 1, 2, 3 для  $b$  равны соответственно 2, 4, 6 мм

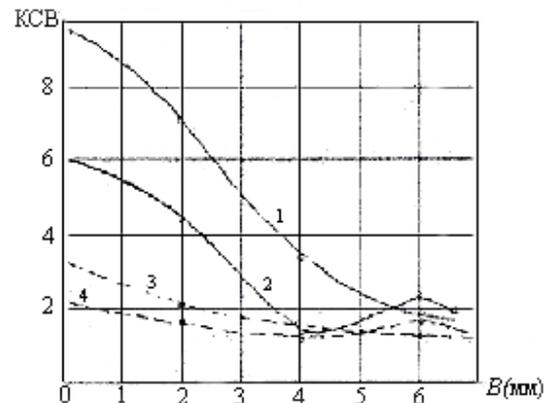


Рис. 13. Характер изменения КСВ от  $b$ . Кривые 1, 2, 3, 4 для  $\lambda_1=8,4$ ,  $\lambda_2=8,15$ ,  $\lambda_3=4,24$ ,  $\lambda_4=4,23$  мм

Таким образом, увеличение ширины анодного отверстия уменьшает коэффициент отражения от анода пушки и следовательно уменьшает резонансность прибора на каждой волне (особенно на короткой). Поэтому анодное отверстие необходимо разделить перегородками не только для того, чтобы не терять часть мощности, выходящей через анодное отверстие, но и для увеличения коэффициента отражения. На многоволновых генераторах, излучающих волны 8 и 4 мм, анодное отверстие размером 4,75 мм было разделено перегородкой толщиной 0,25 мм на две части: 3 и 1,5 мм. На генераторах, излучающих длины волн 16-8-4 мм, анодное отверстие размером 6 мм было разделено на две равные части. Указанные меры способствовали повышению выходных мощностей генераторов на всех излучаемых волнах, хотя и не в полной мере, так как в лучшем случае размеры анодного отверстия должны быть запредельными для всех волн. На практике это осуществить не удаётся, и поэтому

размер анодного отверстия снижают до минимальной величины.

На рис. 14 приведены экспериментальные характеристики трёхчастотного резонансного генератора миллиметрового диапазона, в коллекторной части которого также имеется подвижный отражающий поршень, перемещением которого можно изменять фазу коэффициента отражения во всех поддиапазонах работы многоволнового генератора. Так как фазовые условия генерации при переходе на более коротковолновые поддиапазоны меняются быстрее при перемещении поршня, то при определённом его положении возможен оптимальный случай выполнения фазовых условий на всех излучаемых частотах.

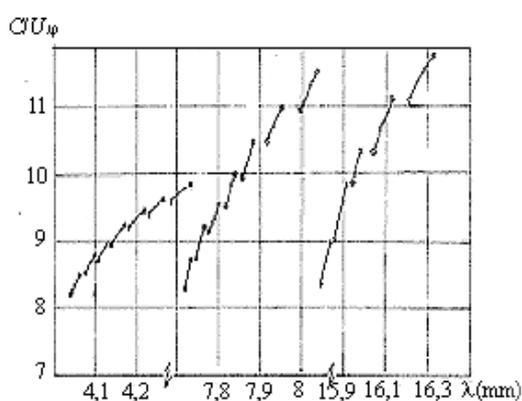


Рис. 14. Дисперсионные характеристики трехчастотного генератора

На базе проведенных исследований были созданы резонансные многоволновые генераторы с электрическими и конструктивными параметрами, не уступающими лучшим образцам обычных одноволновых генераторов. Впервые разработанные в ИРЭ АН Украины многоволновые генераторы нашли широкое применение в ряде физических научно-исследовательских институтов и предприятий страны. Основные параметры приборов приведены в таблице.

Резонансные эффекты, которые воплощены в многоволновом клинотроне миллиметрового диапазона [10], нашли своё отражение в создании нового прибора – клинотрона с резонатором поверхностной волны. Результаты исследований его свойств показали высокую эффективность работы на оптимальных видах колебаний. Эти преимущества очевидны из-за повышенной добротности колебательной системы, проявившихся в более высоких значениях КПД и выходной мощности, а также стабильности частоты и малых габаритах [11].

**Выводы.** Разработанные многоволновые резонансные генераторы миллиметрового диапазона (см. табл.) [8,10], работающие в режиме непрерывного одновременного излучения на не-

скольких частотах, были использованы в основном для многодиапазонной локации движущейся плазмы и для её многодиапазонного просвечивания. В первом случае на основе эффекта Доплера удалось оценить скорости и законы движения фронтов их плазменных образований различной концентрации. Во втором случае - структуру и градиенты плотности плазменных сгустков.

Разработанные многоволновые резонансные генераторы миллиметрового диапазона

Тип лампы	БС-2	МКЛ-4	РК-3	МПК-2
Диапазон длин волн, мм	$\lambda_1=16$ $\lambda_2=8,1$	$\lambda_1=15,5$ $\lambda_2=8,09$ $\lambda_3=4,16$ $\lambda_4=2,3$	$\lambda_2=8,09$ $\lambda_3=4,16$ $\lambda_4=2,3$	$\lambda_2=8,09$ $\lambda_3=4,16$
Выходная мощность в каждом поддиапазоне, Вт	$P_1=1$ $P_2=1$	$P_1=0,5$ $P_2=0,5$ $P_3=0,5$ $P_4=0,5$	$P_2=0,5$ $P_3=0,5$ $P_4=0,5$	$P_2=1$ $P_3=1$
Напряжение, кВ	2,5	2,8	3,0	2,5
Ток анода, А	0,15	0,2	0,15	0,15
Магнитное поле, кЭ	2,5	3,5	3,0	2,5
Вывод энергии, мм <sup>2</sup>	11×5,5	П-образный	7,2×3,4	7,2×3,4

На многоволновых приборах была создана аппаратура по диагностике плазмы: многодиапазонный доплеровский локатор и установка для просвечивания плазмы. По сравнению с диагностическими комплексами "Альфа" и "Малахит" масса и энергопотребление снижены более чем в четыре раза, а достоверность информации о свойствах плазмы существенно возросла. На базе этих генераторов, используя бесконтактные методы зондирования, были созданы быстродействующие фазометры, а также интерферометры типа Фабри-Перо, доплеровские и фазовые локаторы.

Автор выражает искреннюю благодарность проф. А. А. Кириленко за большой научный вклад в идеологию построения многоволновых клинотронов миллиметрового диапазона и непосредственное участие в экспериментах.

1. Голант В. Е. Сверхвысокочастотные методы исследования плазмы // Журн. техн. физики, 1960. - 30. - 1266 с.
2. Чернетский А. В., Зиновьев О. А., Козлов О. В. Аппаратура и методы плазменных исследований. - М.: Атомиздат, 1965. - 364 с.
3. Левин Г. Я., Усиков А. Я., Ваксер И. Х. и др. О возможности создания генератора "Белого радиосвета" в ММД // Тр. Ин-та радиопроизики и электрон. АН УССР. - 1961. - С.263-268.
4. Ефимов Б. П., Левин Г. Я. Генераторы "Белого радиосвета" на волны 16-8-4-2 миллиметра // Тр. Ин-та радиопроизики и электрон АН УССР. - 1963. - 2. - С.146-149.

5. Силин Р. А., Сазонов В. П., Замедляющие системы. - М.: Изд. "Сов. Радио", 1966. - 212 с.
6. Вербицкий И. Л. Дифракция плоской волны на частой гребёнке // Радиотехника и электроника, 1976. - №3. - С.485-496.
7. Вербицкий И. Л. Точные дисперсионные уравнения замедляющих систем, содержащих частую гребёнку // УИИ Межвуз. конф. по электронике СВЧ. Тез. докл. Ростов-на-Дону. - 1976. - 69 с.
8. Клинотрон / Г. Я. Левин, А. И. Бородин, А. Я. Кириченко и др. / Под ред. А. Я. Усикова. - Киев: Наук. Думка, 1992. - 200 с.
9. Постоянные магниты. Справочник / Пер. с англ. под ред. Л. Ш. Казарновского. - М.-Л.: Гос. энерг. издат., 1963. - 239 с.
10. V. P. Yefimov, G. Ya. Levin. Multiwave Resonance BWT of Clinotron type MM Radiowave Band // Int. Journal of Infrared and Millimeter Waves. - 1997. - 18, № 11. - P.31-39.
11. Ефимов Б. П., Касьяненко А. П., Мильчо М. В. Особенности возбуждения генераторов с РПВ // Докл. АН Украины. Сер. А - 1997. - № 7. - С.115-119.

## MULTIWAVE RESONANCE CLINOTRON OF MILLIMETER RANGE

V. P. Yefimov

The description of physical principles for a design of vacuum continuous electromagnetic sources radiating UHF energy simultaneously on several frequencies in millimeter wave range is pre-

sented in this paper. The problems of oscillator-load matching, output power level and frequency control, dispersive dependence calculations, the application of resonance effect in periodic structures and also electron beam focusing in no homogeneous magnetic field are discussed. There are frequency characteristics and output parameters of devices.

**Keywords:** multiwave clinotron, millimeter range, scale modeling.

## БАГАТОХВИЛЬОВИЙ РЕЗОНАНСНИЙ КЛІНОТРОН ММ ДІАПАЗОНУ

Б. П. Єфімов

Описані фізичні принципи побудови вакуумних джерел електромагнітних коливань безперервної дії, які випромінюють НВЧ енергію одночасно на декількох несучих частотах у міліметровому діапазоні. Розглянуто питання узгодження генератора з навантаженням, управління рівнем вихідної потужності та частоти, розрахунок дисперсійних залежностей та використання резонансних ефектів у періодичних структурах, а також фокусування електронних пучків в неоднорідному магнітному полі. Наведено частотні характеристики та вихідні параметри приладів.

**Ключові слова:** багатохвильовий клінотрон, міліметровий діапазон, масштабне моделювання, застосування у діагностичних приладах.

*Рукопись поступила 7 декабря 2006 г.*