

Релятивистский генератор СВЧ-гигаваттного уровня мощности

В.А. Дворников, И.А. Кузьмин, И.В. Поляков, И.С. Щедрин
*Московский государственный инженерно-физический институт
(технический университет), Россия*

Большинство мощных источников СВЧ-излучения до $1 \div 4$ ГВт в импульсе работают в диапазоне 3 см и менее длин волн. Для исследований воздействия на объекты и материалы необходимо создание электродинамической системы (ЭС), способной генерировать электромагнитные волны в 20-см диапазоне. Разрабатываемая схема ЭС использует мощный релятивистский электронный пучок (РЭП) с параметрами: энергия электронов 1,5 МэВ; импульсивный ток 5 кА; длительность импульса 150 нс; длительность фронта 10 нс; диаметр пучка электронов 30 мм. Установка укомплектована импульсной соленоидальной магнитной системой с апертурой 180 мм и длиной 2 м для транспортировки РЭП.

Рассматривается задача создания ЭС от 100 МВт до 1 ГВт с мощным РЭП на основе круглого диафрагмированного волновода (КДВ) для исследований по воздействию на объекты и материалы в 20-см диапазоне длин волн и для питания ускорителей заряженных частиц. Использование РЭП позволяет применять замедляющую систему с постоянными размерами по длине.

ЭС предполагает использование линейной системы генерации СВЧ, разделенной на два участка: модулятор пучка (МП) и генератор СВЧ (ГСВЧ).

Пучок из источника релятивистских электронов поступает в импульсную систему соленоидального магнитного поля, в которой расположена линейная система генерации СВЧ. Применение обычного регулярного КДВ, по-видимому, не осуществимо, так как оценки показывают, что переходной процесс возбуждения КДВ будет сравним с длительностью импульса РЭП $100 \div 150$ нс. Для уменьшения времени возбуждения до величины времени заполнения КДВ, которое определяется групповой скоростью и равно $30 \div 50$ нс, КДВ разделен на 2 участка.

Модуляция пучка электронов осуществляется в коротком отрезке КДВ – МП, имеющем обратную связь с модулирующим резонатором, расположены на входе. Генерация электромагнитной волны осуществляется на втором участке КДВ – ГСВЧ. Вывод энергии СВЧ может быть осуществлен через выходной трансформатор типа волны (ТТВ) в прямоугольный волновод или в несколько волноводов. Возможен вывод аксиально через рупорную антенну.

Условия возбуждения СВЧ-колебаний в КДВ явно недостаточны при заданных временных параметрах пучка электронов ($t_u = 100 \div 150$ нс и $t_\phi = 10$ нс), и необходимо использовать МП на входе КДВ с использованием резонатора с низким значением нагруженной добротности, чтобы снизить время самовозбуждения до $30 \div 50$ нс. Основой ГСВЧ выбран КДВ. Длина МП должна быть как можно короче, чтобы достигать необходимой модуляции для заданного уровня генерации. Параметр a/λ КДВ ограничен сверху величиной 0,16 и определяется внутренним размером внешнего кожуха и длиной волны $\lambda = 20$ см. Параметр t/λ равен 0,038. Вид колебаний выбираем $\theta = \pi/2$. Материал для изготовления КДВ — нержавеющая сталь.

В состав СВЧ-генератора входят следующие основные узлы: проходной резонатор МП; модулятор пучка — отрезок КДВ длиной $2 \div 4$ ячейки; ТТВ на выходе МП; узел обратной связи с фазовращателем или другая аналогичная система обратной связи; ГСВЧ — отрезок КДВ длиной 7 ячеек; выходной ТТВ или рупорная антенна.

Заготовки ячеек ЭС изготавливают из нержавеющей листовой стали $t = 20$ мм и $t = 10$ мм. Основными элементами являются кольца и диафрагмы. Отверстие в диафрагме имеет скругление. Радиус скругления края отверстия диафрагмы равен половине ее толщины $R = t/2$.

Предполагается, что скорость пучка электронов будет изменяться незначительно. Это позволило выбрать КДВ с постоянным периодом и постоянными внутренними размерами ячеек. Действительно, при энергии пучка на входе в КДВ 1,5 МэВ относительная скорость электронов по сравнению со скоростью света в вакууме равна 0,968. При сохранении тока в пучке на протяжении всего КДВ, при мощности пучка электронов на входе 7,5 ГВт и при мощности излучения СВЧ на выходе 1 ГВт энергия электронов уменьшится до величины 1,3 МэВ. Это приведет к снижению относительной скорости электронов на выходе до величины 0,961. Для вышеприведенных значений длин отрезков КДВ это уменьшение скорости электронов может привести к скольжению менее 1% от всей длины КДВ или около 2% по отношению к длине волны. Поэтому выбор КДВ с постоянным периодом достаточно оправдан.

Расчет мощности излучения проводится в предположении, что модуляция потока по скорости происходит в основном зазоре проходного резонатора МП. Задача сводится к нахождению основной гармоники тока. Поскольку общее число ячеек нам неизвестно заранее, то определяют его последовательным расчетом, определяя мощность излучения в среднем сечении j -й ячейки и суммируя ее с мощностями всех предыдущих ячеек.

Оценочные расчеты показывают, что максимальная генерируемая мощность достигается в 10-й ячейке и составляет величину ~ 1 ГВт в импульсе. Расчеты затухания показывают, что потери мощности не превышают доли процента на расстоянии, равном одному периоду, а на всей длине не превышают нескольких процентов, и поэтому на начальном этапе расчетов затуханием можно пренебречь. Мощность 1 ГВт является предельной, так как при напряженности поля на оси КДВ, равной 420 кВ/см, на поверхности КДВ на кромке диафрагмы напряженность возрастает в 2,1 раза, т.е. 880 кВ/см.

Таким образом, на основе РЭП с энергией 1,5 МэВ и током 5 кА реализация ЭДС на основе КДВ позволит получать уровни мощности, достигающие 1 ГВт в импульсе на рабочей длине волны $\lambda = 20$ см. Внутренние размеры импульсной системы соленоидального магнитного поля позволяют осуществить генерацию СВЧ-мощности в диапазоне от 10 до 20 см при соответствующем выборе размеров КДВ. Длительность процесса самовозбуждения СВЧ-генератора может составить величину $50 \div 55$ нс. Предложенная схема генерации ранее не применялась, и поэтому ее разборная конструкция позволит детально исследовать ее характеристики. Представляет практический интерес разработка данного метода генерации электромагнитных волн на основе мощного РЭП в других диапазонах длин волн от 10 до 3 см.

На первом этапе рассмотрение различных вариантов системы возбуждения электромагнитных колебаний в ЭДС РЭП показало, что может быть рассмотрена наиболее простая схема, включающая расположение на входе системы резонатора, имеющего выход СВЧ-сигнала в волновод. Допущения следующие: ток в виде точечных сгустков, режим стационарный, вопросы транспортировки сгустков и радиальные движения электронов не рассматриваются, Кулон и процессы “утилизации” “отработавших” сгустков не учитываются.

Следуя [1], запишем уравнение движения электрона в электромагнитном поле вдоль оси z :

$$m_0 \frac{d(\gamma \cdot \nu)}{dt} = -eE_0 \sin \omega t, \quad (1)$$

где m_0 — масса электрона; e — заряд электрона; E_0 — амплитуда электрической продольной составляющей электромагнитного поля; ω — круговая частота; t — время; $\gamma = 1/\sqrt{1-\beta^2}$; $\beta = \nu/c$. Проинтегрируем, получим:

$$\gamma \cdot \nu = \gamma_0 \nu_0 + \left(\frac{eE_0}{\omega m_0} \right) (\cos \omega t - 1). \quad (2)$$

Рассмотрим случай резонатора на виде колебаний E_{010}^o , где тормозясь, останавливаются сгустки, т.е. $\nu = 0$, Тогда

$$\gamma_0 \nu_0 + \left(\frac{eE_0}{\omega m_0} \right) \cos \omega t - \left(\frac{eE_0}{\omega m_0} \right) = 0,$$

т.е.

$$\cos \omega t = 1 - \left(\frac{\gamma_0 \nu_0 \omega m_0}{e E_0} \right). \quad (3)$$

Оптимальным углом пролета является $\omega t = \pi$, так как требуется минимальная амплитуда поля. Минимальное значение напряженности достигается при $\omega t = \pi$, т.е.

$$E_0 = \left(\frac{\pi}{\lambda} \right) \cdot \gamma_0 \cdot \beta_0 \cdot \left(\frac{m_0 c^2}{e} \right). \quad (4)$$

Используя известные соотношения для резонатора и круглого волновода на E_{10}^o [2], [3] и (3), получаем

$$P_n = \frac{\pi^2}{8} \cdot \frac{d^2}{\lambda^2} \cdot \left(\frac{\gamma_0^2 \cdot \beta_0^2}{z_0 \cdot \sqrt{1 - \frac{\lambda^2}{\lambda_{кр}^2}}} \right) \cdot \left(\frac{m_0^2 c^4}{e^2} \right). \quad (5)$$

Для оценок скорость электронов на входе равна c , т.е. $\beta_0 = 1$, $d = 0,35 \cdot \lambda$ и

$$P_n \cong \frac{\pi^2}{64} \cdot \left(\frac{\gamma_0^2}{\sqrt{1 - \frac{\lambda^2}{\lambda_{кр}^2}}} \right) \cdot \left(\frac{m_0^2 c^4}{z_0 \cdot e^2} \right), \quad (6)$$

где $W_0 = m_0 c^2 = 0,511$ МэВ; $\gamma_0 = W/W_0$; W — энергия пучка на входе; e — заряд электрона; λ — длина волны генерации; $\lambda_{кр}$ — критическая длина волны круглого волновода.

Амплитуда напряжения на резонаторе

$$U = E_0 \cdot d = 0,35 \cdot E_0 \cdot \lambda = 0,35 \cdot \pi \cdot \gamma_0 \cdot \left(\frac{m_0 c^2}{e} \right)^2$$

для случая $\gamma_0 = 4$, равно $U = 2,25$ МВ. Мощность генерации равна $P_n = 2,85$ ГВт.

Оценка показала, что при заданной энергии электронов 1,5 МэВ мощности источника вполне достаточно при токе 5 кА, чтобы достичь максимальной генерации порядка 2,85 ГВт.

Следует отметить, что выражение (6) несколько отличается от формулы, полученной в работе [4]. Существенно, что в релятивистском случае появляется коэффициент γ^2 .

Литература

- [1] Лебедев И.В. Техника и приборы СВЧ. Т. II. Электровакуумные приборы СВЧ. / Под ред. Н.Д.Девяткова. Изд. 2-е перераб. и доп. — М.: Высшая школа, 1972.
- [2] Диафрагмированные волноводы. Справочник. / О.А.Вальднер, Н.П.Собенин, Б.В.Зверев, И.С.Щедрин. 3-е изд., перераб. и доп. — М.: Энергоатомиздат, 1991. 280 с.
- [3] Каретников Д.В., Сливков И.Н., Тепляков В.А., Федотов А.П., Шембель Б.К. Линейные ускорители ионов. — М.: Госатомиздат, 1962.
- [4] Диденко А.Н. О предельно допустимом уровне мощности импульсных СВЧ-генераторов на основе сильноточных электронных ускорителей. Доклады академии наук, 1997. Т.356, №4, с.470-471.