

УДК 621.385.6

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ДВУХСЕКЦИОННОГО СВЧ-УМНОЖИТЕЛЯ ЧАСТОТЫ ЧЕРЕНКОВСКОГО ТИПА НА РЕЛЯТИВИСТСКОМ ЭЛЕКТРОННОМ ПУЧКЕ

А. Ф. Александров, В. В. Михеев, В. Ю. Сергиенко
Московский государственный университет, Москва, Россия

А. М. Кузнецов
Тульский государственный педагогический университет, Тула, Россия

Исследованы режимы работы двухсекционного СВЧ-умножителя черенковского типа с пространственно развитой выходной секцией с коэффициентом умножения по частоте $n = 3$. Показана принципиальная возможность использования таких устройств в релятивистской области энергий электронов для получения мощных импульсов СВЧ-излучения.

Умножители частоты черенковского типа хорошо известны в традиционной СВЧ-электронике [1], где они были реализованы на относительно слаботочных пучках нерелятивистских электронов. Экспериментальные схемы этих умножителей, наряду с секцией группировки и отбора энергии электронов, включали область, где происходила догруппировка электронного потока (пространство дрейфа).

Отличие рассматриваемого умножителя частоты черенковского типа от известных состоит в том, что он является двухсекционным (пространство дрейфа в экспериментальном макете не предусмотрено) и для своей работы использует сильноточный релятивистский электронный пучок, что позволяет получать высокий уровень СВЧ-мощности, причем первая секция умножителя работает в режиме автогенератора.

В работе излагаются результаты экспериментальных исследований предложенного макета двухсекционного СВЧ-умножителя частоты черенковского типа на релятивистском электронном пучке. Эксперименты проводились на ускорительном комплексе "Тандем-1" [2] с использованием экспериментальных методик, подробно изложенных в работе [3].

В качестве первой секции умножителя использовалась лампа обратной волны (ЛОВ), выполненная на основе цилиндрического волновода с глубокой гофрировкой и с "запредельным" для генерируемой ЛОВ частоты волноводом на входе электродинамической системы, что обеспечило вывод СВЧ-энергии в сторону коллектора электронов (релятивистский карсинотрон). Параметры замедляющей системы были следующими: $R_{ex} = 3,30$ см, $R_{in} = 2,65$ см, $d = 2,60$ см, $a = 1,30$ см, $2b = 0,65$ см. Было проведено экспериментальное исследование "холодных" (без электронного потока) дисперсионных свойств системы в режиме стоячей волны (резонансный метод) [4] в диапазоне частот 2,0—12,0 ГГц. Сравнение экспериментальных результатов с расчетными, которые были получены по данным работы [4] для частот верхней полосы прозрачности замедляющей системы ЛОВ, показывает, что их отличие составляет меньше 6 %.

Проведенные исследования позволяют определить в кинематическом режиме примерное значение длины волны излучения ЛОВ (для энергии электронов $W_e \approx 400$ кэВ, $\lambda_{ген} \approx 5,5$ см).

При исследовании зависимости спектрального состава СВЧ-излучения от диаметра релятивистского электронного потока d_b было замечено, что в определенном диапазоне изменения d_b существует излучение только на расчетной (основной) длине волны $\lambda_{\text{рен}} \approx 5,5$ см (1) (рис. 1, а, кривая 1), затем появляется паразитная высокочастотная составляющая (кривая 2) на длине волны $3,07 \leq \lambda \leq 4,6$ см, а потом добавляется излучение (кривая 3) с длиной волны $\lambda \leq 3,07$ см. Появление высокочастотного излучения, по-видимому, связано с возбуждением высших мод электродинамической системы. Необходимо подчеркнуть, что высокочастотные составляющие вносят при этом довольно малый вклад в суммарную мощность СВЧ по сравнению с излучением на расчетной частоте (см. рис. 1, а). Мощность СВЧ-излучения на основной частоте, как показывает эксперимент, зависит от диаметра электронного потока и с его увеличением растет. Довольно резкий спад на этой кривой мощности после достижения максимума объясняется уменьшением тока электронного пучка (см. рис. 1, б), которое, в свою очередь, обусловлено осаждением внешней части электронного потока на входную графитовую диафрагму диаметром $d_d = 40$ мм. В этих экспериментах не зарегистрировано существенного изменения длительности СВЧ-излучения на расчетной длине волны и его значение составляет $\tau_{\text{и}} \approx 300$ нс (рис. 2). Однако в ряде экспериментов наблюдалось увеличение длительности (при относительно малой мощности) паразитной генерации ($3,07 \leq \lambda \leq 4,6$ см) до $\tau_{\text{и}} \approx 1$ мкс. Как показали последующие эксперименты, это связано с возбуждением замедляющей системы ЛОВ несимметричным электронным потоком (вследствие осаждения его части на диафрагму), и при дополнительной юстировке уровень мощности паразитной генерации опускался ниже порога регистрации.

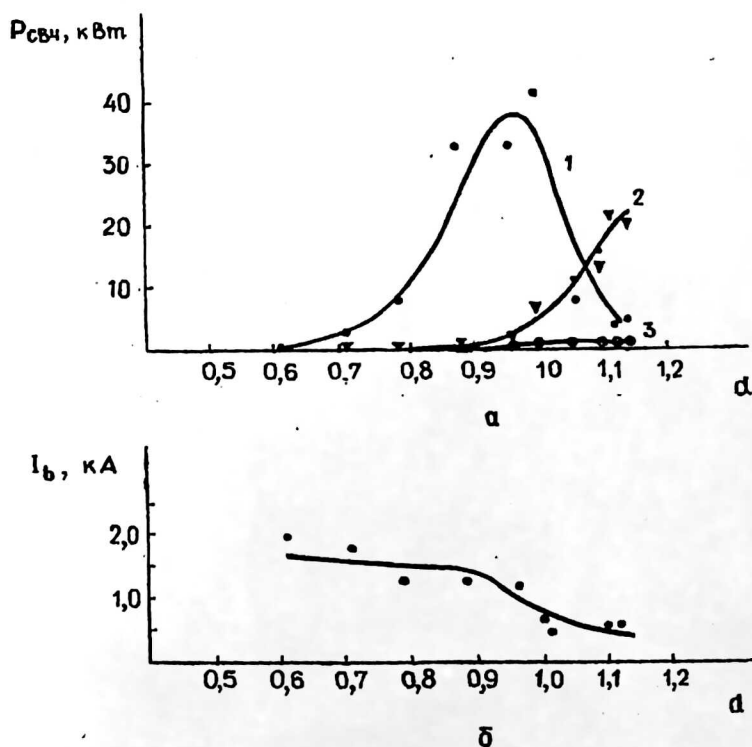


Рис. 1. Спектральный состав излучения ЛОВ и ток электронного потока I_b как функция параметра d ($d = d_b / d_d$, где d_b — диаметр электронного потока, (d_d — диаметр входной диафрагмы):
 а: 1 — излучение на длине волны $5,46 \leq \lambda \leq 6,14$ см; 2 — излучение на длине волны $3,07 \leq \lambda \leq 4,6$ см; 3 — излучение на длине волны $\lambda < 3,07$ см; б — ток электронного потока I_b

Дальнейшие измерения длины волны $\lambda_{\text{ген}}$ генерируемого ЛОВ излучения с помощью СВЧ-детектора с набором "запредельных" волноводов при токе пучка $I_b \approx 1,7$ кА и диаметре электронного потока $d_b \approx 30$ мм (энергия электронов $W_e \approx 400$ кэВ) показали, что она лежит в диапазоне $5,46 \leq \lambda_{\text{ген}} \leq 6,14$ см. Измерения были проведены при однородном ведущем магнитном поле B_0 в замедляющей системе длиной в 12 периодов гофра. Электронный поток эмитировался кромочным катодом из графита с диаметром $d_c = 48$ мм. Таким образом, эксперименты в "горячей" замедляющей системе с электронным потоком достаточно хорошо согласуются с описанными выше "холодными" измерениями.

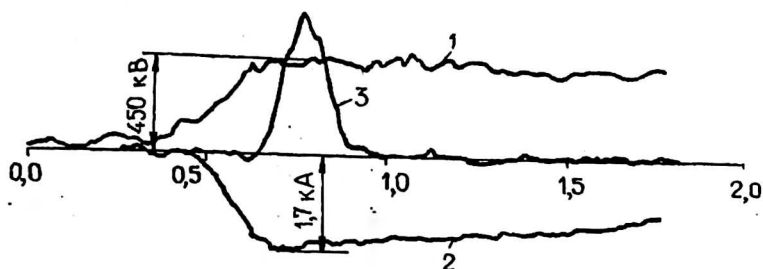


Рис. 2. Характерные импульсы СВЧ-излучения: (3) первой секции умножителя частоты — ЛОВ генератора ($\lambda_{\text{ген}} \approx 5,5$ см), (2) — тока пучка I_b , (1) — ускоряющего напряжения

Пространственное распределение СВЧ-излучения ЛОВ генератора, зарегистрированное с помощью полупроводникового детектора на расстоянии $L \approx 50$ см от выходного рупора ускорителя, позволило определить полную мощность $P_{\text{SHF}} \approx 15$ МВт на расчетной длине волны $\lambda_{\text{ген}} \approx 5,5$ см, а также отождествить поперечную моду, на которой происходит излучение. Характерный провал по мощности в середине диаграммы направленности и спад по краям после максимумов свидетельствуют о том, что генератор, как и предполагалось, работает на нижней аксиально-симметричной моде E_{01} . Аналогичные результаты по оценке мощности СВЧ-излучения и определению его пространственного распределения были получены независимо от изложенных выше методом визуализации пространственного распределения СВЧ-излучения в выходном окне системы по СВЧ-пробую в диэлектрической вакуумной камере [51].

В качестве второй секции (усилительная секция ЛБВ) умножителя частоты использовалась электродинамическая система, выполненная на основе сверхразмерного цилиндрического волновода с глубокой периодической гофрировкой, в результате чего, наряду с (-1) -й пространственной гармоникой оказывается замедленной и (0) -я пространственная гармоника нижней аксиально-симметричной электрической моды E_{01} . Геометрические размеры усилительной секции ЛБВ должны быть выбраны таким образом, чтобы при совместной работе с первой секцией умножителя обеспечить выделение и усиление третьей гармоники модулированного тока пучка, т. е. коэффициент умножения по частоте $m_f = 3$.

Экспериментально исследовались две замедляющие системы с различной высотой гофра. Усилительная секция в геометрии 1 имела следующие параметры: $D_{ex} = 5,36$ см, $D_{in} = 5,0$ см, $d = 0,44$ см. Характеристики усилительной секции в геометрии 2: $D_{ex} = 5,7$ см, $D_{in} = 5,0$ см, $d = 0,44$ см. Для возможности изменения длины взаимодействия (усиления секции) обе замедляющие системы были выполнены секционированными (по 10 и 11 периодов гофра в секции), а для обеспечения необходимого согласования на входе и выходе было предусмотрено плавное

изменение гофра по высоте. Радиус электронного потока в этих системах регулировался амплитудой ведущего магнитного поля.

Экспериментальные измерения дисперсионных характеристик рассматриваемых замедляющих структур обычными методами [4] сильно затруднены из-за возбуждения резонансов высшего порядка периодической системы и невозможности выделения резонансов низшей моды. Поэтому дисперсионные характеристики этих систем определялись численным методом.

Измерения выходного излучения секции ЛБВ в геометрии 1 и 2 показали отсутствие ее возбуждения на расчетной длине волны $\lambda = 1,8$ см, которая соответствует коэффициенту умножения по частоте $m_f = 3$ при рабочей длине волны задающего генератора $\lambda_{ген} = 5,5$ см. Вместе с тем, для геометрии 1 при радиусе электронного потока ($d_b \approx 40$ —45 мм и длине системы $L = 22 d$ на фронте импульса ускоряющего напряжения было зарегистрировано высокочастотное излучение в диапазоне длин волн $1,02 \leq \lambda \leq 1,37$ см с малой мощностью.

Эксперименты с секцией ЛБВ для геометрии 2 также показали наличие самовозбуждения, но на длине волны $1,71 \leq \lambda \leq 2,05$ см (рис. 3) мощностью $P_{SHF} \approx 100$ кВт. Диаграмма направленности интенсивности СВЧ-излучения, зарегистрированная на расстоянии ≈ 20 см от выходного рупора ускорителя приемной рупорной антенной $8,5 \times 14$ см полупроводникового СВЧ-детектора, представляла собой почти однородное пространственное распределение. Импульс высокочастотного излучения при диаметре электронного потока $d_b \approx 40$ мм и длине секции $L = 30 d$ регистрировался только на фронте импульса ускоряющего напряжения U_a в диапазоне 150—250 кВ длительностью $\tau \approx 0,18$ мкс по основанию. При увеличении длины секции до $L = 40 d$, а диаметра электронного потока до $d_b \approx 43$ мм, самовозбуждение регистрировалось не только на фронте, но и на спаде ускоряющего напряжения примерно в том же диапазоне значений U_a .

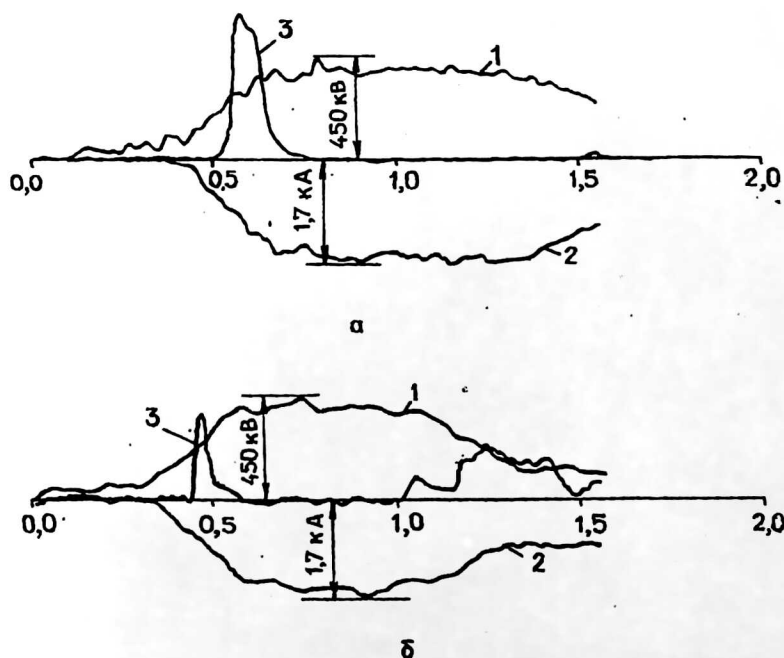


Рис. 3. Импульсы СВЧ-излучения: 1 — ускоряющего напряжения U_a ; 2 — тока пучка I_b ; 3 — секции ЛБВ в режиме самовозбуждения ($1,71 \leq \lambda \leq 2,05$ см).
а — $L = 30 d$, $d_b = 40$ мм; б — $L = 40 d$, $d_b = 43$ мм

Наблюдаемое "паразитное" излучение, по всей видимости, можно объяснить возбуждением электродинамической системы в частотной области, примыкающей к π -виду (для геометрии 1 — $\lambda l \approx 1,12$ см, для геометрии 2 — $\lambda l \approx 1,73$ см), что связано как с особенностью дисперсионной характеристики замедляющей системы (большое замедление), так и с характером нарастания и спада ускоряющего напряжения, когда с течением времени происходит своеобразная "развертка" по энергии электронного потока.

Экспериментальный макет исследуемого двухсекционного СВЧ-умножителя частоты черенковского типа на релятивистском пучке электронов представлен на рис. 4.

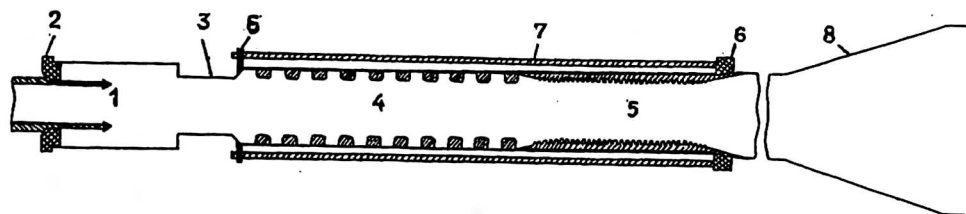


Рис. 4. Экспериментальный макет двухсекционного СВЧ-умножителя частоты черенковского типа на релятивистском потоке электронов:

- 1 — электронный пучок; 2 — графитовая диафрагма; 3 — заперделный волновод;
- 4 — 1-я секция (ЛОВ-генератор); 5 — 2-я секция (усилительная ЛБВ); 6 — центрирующие втулки;
- 7 — шпильки крепления; 8 — латунный конический коллектор электронов

Первые эксперименты по реализации умножителя с коэффициентом умножения по частоте $m_f = 3$ показали возможность создания таких приборов в релятивистской области энергии электронов при использовании сильноточных электронных пучков. Однако мощность излучения, зарегистрированная в эксперименте на длине волны $1,71 \leq \lambda_2 \leq 2,05$ см (при длине волны накачки (ЛОВ-генератор) $\lambda_1 \approx 5,5$ см), едва достигала 1 МВт. Длина первой секции умножителя (ЛОВ-генератора) составляла $L_1 = 10 d_1$, длина второй, усилительной секции ЛБВ с параметрами, соответствующими геометрии 1, $L_2 = 22 d_2$. Тонкостенный трубчатый электронный пучок с током 1,5 кА формировался с помощью графитового катода при ускоряющем напряжении 450 кВ. Длительность импульса ускоряющего напряжения регулировалась срезающим разрядником и составляла 1,5—3 мкс. Фокусировка электронного пучка осуществлялась продольным магнитным полем, индукция которого изменялась в пределах 15—25 кгс. Низкий уровень мощности высокочастотного излучения, наблюдавшийся в эксперименте, объясняется неоптимальной отстройкой скорости электронов от фазовой скорости волны, частота которой соответствует ожидаемому коэффициенту умножения по частоте $m_f = 3$.

Экспериментальные исследования умножителя частоты с усилительной секцией ЛБВ в геометрии 2 были проведены при токе электронного пучка $I_b \approx 1,7$ кА, при ускоряющем напряжении $U_a = 450$ кВ. Ведущее магнитное поле в области первой секции составляло 16 кгс, а во второй — 9 кгс. Электродинамическая система экспериментального макета содержала 10 периодов d_1 первой секции и 30 периодов d_2 второй секции. При диаметре электронного потока в первой секции $d_{b1} \approx 30$ мм и во второй $d_{b2} \approx 40$ мм было зарегистрировано высокочастотное излучение (рис. 5, кривая 4), соответствующее коэффициенту умножения по частоте $m_f = 3$, длина волны которого находилась в интервале $1,71 \leq \lambda_2 \leq 2,05$ см.

Длина волны модулирующего электронный поток излучения (первой секции), как и в предыдущем случае, составляла $\lambda_1 \approx 5,5$ см. Мощность и длительность модулирующего излучения с длиной волны λ_1 контролировались по участку диаграммы направленности, непересекающемуся с диаграммой направленности высокочастотного излучения λ_2 . При этом заметного изменения мощности и длительности излучения первой секции не зарегистрировано. Пространственное распределение интенсивности СВЧ-излучения измерялось перемещением открытого конца прямоугольного волновода 23×10 мм² на расстоянии 70 см от выходного конического рупора ускорителя. Оценка мощности, произведенная по диаграмме направленности, составила 10 МВт. Пространственное излучение, зарегистрированное в эксперименте, соответствовало структуре поля моды E_{01} .

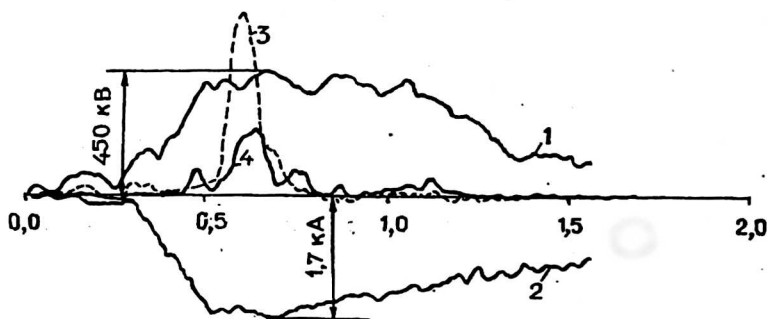


Рис. 5. Импульсы ускоряющего напряжения U_a (1), тока пучка I_b (2) и СВЧ-излучения умножителя частоты на длинах волн λ_1 (3) и λ_2 (4)

На рис. 5 представлены характерные импульсы СВЧ-излучения, соответствующие длинам волн λ_1 (кривая 3) и λ_2 (кривая 4). Длительность высокочастотного излучения (λ_2) соответствовала длительности задающей генерации (λ_1) первой секции и составляла $\tau_1 \approx 0,3$ мкс. При увеличении диаметра электронного потока во второй секции умножителя частоты до $d_{b2} \approx 43$ мм заметного изменения мощности и диаграммы направленности на длине волн λ_1 не наблюдалось.

Сравнение полученных данных с результатами теоретических исследований [6] дает все основания полагать, что дальнейшая оптимизация умножителя частоты данного типа позволит достичь существенно больших значений мощности высокочастотного излучения.

Литература

1. Бурейка К. П., Канавец В. И., Ни Н. П., Сандалов А. Н. / Электронная техника. Сер. 1/ Электроника СВЧ, 1970. № 6. С.31–39.
2. Александров А. Ф., Галузо С. Ю., Канавец В. И., Плетюшкин В. А., Слепов А. И. // ЖТФ, 1980. Т. 50. № 11. С. 2381–2389.
3. Басиладзе С. Г., Галузо С. Ю., Каравичев М. В., Кузнецов А. М., Михеев В. В., Шукин Ю. Д. Модули и программное обеспечение систем автоматизации экспериментальных исследований. — М.: Изд-во МГУ, 1990. С. 130–137.
4. Галузо С. Ю. // РиЭ, 1982. Т. 27, № 3. С. 559–563.
5. Александров А. Ф., Галузо С. Ю., Кузнецов А. М. // Вестник МГУ. Сер. 3. Физика, астрономия, 1992. Т. 33. № 5. С. 82–84.
6. Александров А. Ф., Галузо С. Ю., Канавец В. И., Кузнецов А. М., Михеев В. В. // РиЭ, 1995. Т. 40. № 8. С. 1285–1291.

**EXPERIMENTAL RESEARCHES OF A TWO-SECTION MICROWAVE
FREQUENCY MULTIPLIER OF A CERENKOV TYPE ON A RELATIVISTIC
ELECTRON BEAM**

A. F. Aleksandrov, V. V. Mikheev, V. Yu. Sergienko
Moscow state university, Moscow, Russia

A. M. Kuznetsov
Tula state pedagogic university, Tula, Russia

Modes of operation of a two-section microwave frequency multiplier of a Cerenkov type with spatially distributed output section with a factor of frequency multiplication $n = 3$ are investigated. Principal opportunity for such devices use in relativistic area of electron energy for high power microwave radiation pulses reception is shown.