Минск, 1983. Т. 2. С. 303. [3] Груздев В. В., Моденов В. П., Пирогов Ю. А., Фоминова Э. Е.//Вестн. Моск. ун-та. Физ. Астрон. 1992. 33, № 5. С. 79. [4] Шестопалов В. П., Кириленко А. А., Рудь Л. А. Резонансное рассеяние волн. Т. 2. Волноводные неоднородности. Киев, 1986. [5] Мериакри В. В., Мурмужев Б. А., Ушаткин Е. Ф.//ЖТФ. 1981. 51, № 9. С. 2395. [6] Кошелев О. Г., Плескачева Т. Б.//Изв. вузов, Радиоэлектроника. 1990. 33, № 10. С. 53. [7] Смит Р. Полупроводники. М., 1982. [8] Аут И., Генцов Д., Герман К. Фотоэлектрические явления. М., 1980.

Поступила в редакцию
20.10.92

ВЕСТН. МОСК. УН-ТА. СЕР. 3, ФИЗИКА. АСТРОНОМИЯ. 1993. Т. 34, № 3

УДК 621.385.6

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ СЕКЦИОНИРОВАННОГО РЕЛЯТИВИСТСКОГО СВЧ-УМНОЖИТЕЛЯ ЧАСТОТЫ ЧЕРЕНКОВСКОГО ТИПА

А. Ф. Александров, С. Ю. Галузо, В. И. Канавец, А. М. Кузнецов
(кафедра физической электроники)

Проведено экспериментальное исследование двухсекционного умножителя частоты черенковского типа с коэффициентом умножителя по частоте $n=3$. В качестве первой секции такого умножителя использовался черенковский генератор типа ЛОВ, в качестве второй — ЛБВ. Показана принципиальная возможность создания таких приборов в релятивистской области энергии электронов при использовании сильноточных электронных потоков.

Необходимость дальнейшего повышения уровня энергии мощных импульсов СВЧ-излучения в СВЧ-устройствах на сильноточных релятивистских электронных пучках требует перехода к сверхразмерным электродинамическим системам (диаметр

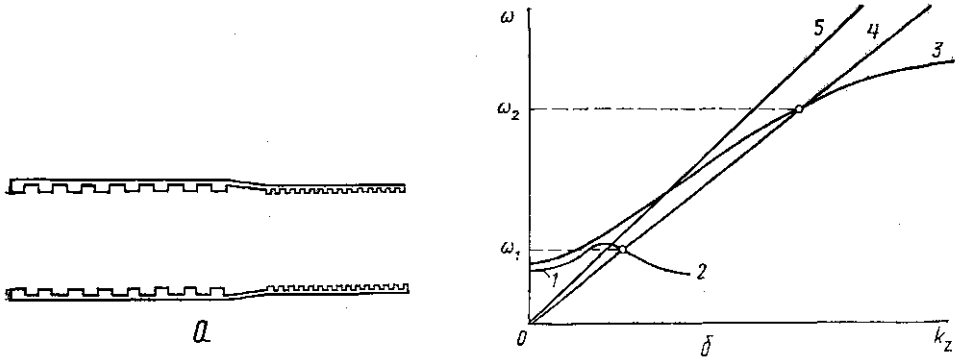

Рис. 1. Схема эксперимента: электродинамическая система умножителя частоты (*а*) и ее дисперсионные характеристики для моды E_{01} (*б*): кривые дисперсии 0-й (*1*) и (—1)-й (*2*) пространственных гармоник замедляющей системы для первой секции умножителя частоты и 0-й пространственной гармоники замедляющей системы для второй секции (*3*); линия электронного потока $\omega=k_z v_e$ (*4*) и линия $\omega=k_z c$ (*5*)

волновода $D\gg\lambda$, рис. 1, *а*) [1—3]. Однако в таких устройствах возникает ряд трудностей, связанных с обеспечением одночастотного режима работы [3]. Одним из возможных путей решения этой проблемы [4] может быть использование предварительной модуляции электронного потока на относительно низкой частоте в первой секции устройства, поперечные размеры которой порядка λ, с последующим выделением и усилением сигнала высших гармоник тока пучка в выходной пространственно развитой секции с теми же поперечными размерами, но на существенно более короткой длине волны. Движение по этому пути приводит к созданию СВЧ-умножителя частоты.

Умножители частоты черенковского типа хорошо известны в традиционной СВЧ-электронике, где они были опробованы на относительно слаботочных пучках нерелятивистских электронов [5—8]. В этих устройствах сигнал основной частоты задается, как правило, внешним источником колебаний. В экспериментах с релятивистскими сильноточными пучками такой способ возбуждения реализовать значительно труднее, поэтому обычно используют устройства с самовозбуждением на основной частоте. В частности, в данной работе в качестве первой секции умножителя был выбран черенковский генератор типа ЛОВ с электродинамической системой в виде цилиндрического волновода со слабой гофрировкой стенок (см. рис. 1). В этой секции основным механизмом взаимодействия является черенковское взаимодействие электронного потока с (—1)-й пространственной гармоникой встречной волны. В качестве рабочей была использована низшая азимутально симметричная мода E_{01}. Самовозбуждение первой секции приводит к модуляции электронного потока на частоте ω_1 (рис. 1, *б*).

Электродинамическая система второй секции умножителя (секция ЛБВ) также представляла собой отрезок гофрированного цилиндрического волновода. В отличие от первой секции относительное значение высоты гофра было выбрано существенно бо́льшим, при этом в широком диапазоне частот замедленной оказывается и основная (0-я) пространственная гармоника рабочей моды E_{01}. Во второй секции электронный поток может находиться в синхронизме не только с 0-й пространственной гармоникой попутной волны моды E_{01} на частоте ω_2 (см. рис. 1, *б*), но и с другими модами структуры на соответствующих частотах. При выполнении условия $\omega_2=n\omega_1$, где n — целое, следует ожидать эффективного выделения сигнала n-й гармоники тока пучка на одной частоте ω_2.

Эксперименты проводились на сильноточном электронном ускорителе «Тандем-1» [9, 10]. Тонкостенный трубчатый электронный пучок с током 1,5 кА формировался с помощью графитового катода при ускоряющем напряжении 450 кВ. Длительность импульса питания регулировалась срезающим разрядником и составляла 1,5—3 мкс. Фокусировка электронного пучка проводилась с помощью продольного магнитного поля, индукция которого изменялась в пределах 15—25 кГс. Внутренний диаметр первой секции был выбран равным $D_{\text{in}1}\approx5{,}3$ см, а второй — $D_{\text{in}2}\approx5$ см. Диаметр пучка в первой секции составлял ~3,5 см. Для более эффективного взаимодействия с полем во второй секции диаметр пучка в ней был увеличен до ~4,5 см, что достигалось соответствующим изменением величины продольного магнитного поля. Период гофра в первой секции составлял $d_1=2{,}6$ см, а во второй — $d_2=0{,}44$ см. Параметры гофра во второй секции были выбраны таким образом, чтобы обеспечить кратность преобразования по частоте $n=3$, или в длинах волн $\lambda_1/\lambda_2=3$. Длины секций составляли $L_1=10\ d_1$ и $L_2=22\ d_2$.

Экспериментальные исследования одной первой секции умножителя показали, что наблюдается возбуждение генератора на длине волны $\lambda_1=2\pi c/\omega_1\approx5{,}5$ см. Длительность импульсов излучения составляла ~300 нс. Структура поля излучения на расстоянии 50 см от выходной рупорной антенны, приведенная на рис. 2, соответствовала расчетной моде E_{01}. Интегральная мощность излучения на частоте ω_1 менялась в зависимости от диаметра электронного потока и составляла 10—50 МВт [11]. Мощность излучения этой секции в диапазоне длин волн $\lambda<2{,}75$ см не превышала 100 кВт.

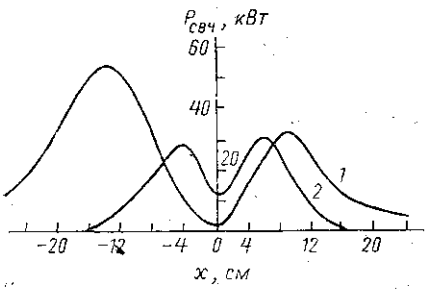

Рис. 2. Пространственное распределение мощности выходного СВЧ-излучения: *1* — зависимость для случая работы одной первой секции на длине волны $\lambda_1\simeq5{,}5$ см, измеренная на расстоянии 50 см от выходного СВЧ-окна; *2* — зависимость для умножителя частоты, измеренная с запредельным волноводом (критическая длина волны 2,05 см) на расстоянии 15 см от выходного СВЧ-окна

Экспериментальное исследование одной второй секции показало отсутствие возбуждения на расчетной частоте моды E_{01}. При нарушении аксиальной симметрии электронного пучка на фронте импульса питания было зарегистрировано паразитное возбуждение в диапазоне длин волн 1,02 см$<\lambda<$1,37 см.

Характерные импульсы низкочастотного и высокочастотного излучения на выходе СВЧ-умножителя частоты (при совместной работе обеих секций), синхронизи-

рованные с током пучка, представлены на рис. 3. Длина волны высокочастотного излучения λ_2 лежала в диапазоне 1,71 см$<\lambda_2<$2,05 см, что соответствует кратности преобразования по частоте $n=3$. Пространственное распределение высокочастотной части выходного СВЧ-излучения ($\lambda<$2,05 см), измеренное на расстоянии 15 см от

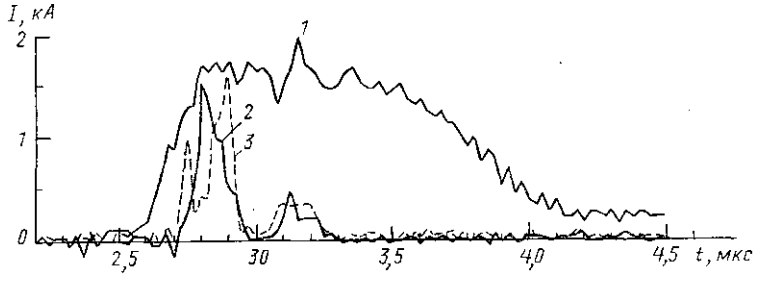

Рис. 3. Характерные импульсы тока пучка (*1*) и выходной мощности СВЧ-излучения умножителя частоты на длинах волн λ_1 (*2*) и λ_2 (*3*)

рупорной антенны (см. рис. 2, *а*), согласуется с расчетной модой типа E_{01}. Мощность излучения в этом спектральном диапазоне, определенная по диаграмме направленности, составила около 1 МВт.

Таким образом, проведенные экспериментальные исследования показывают возможность создания секционированных СВЧ-умножителей частоты черенковского типа в релятивистской области энергий электронов при использовании сильноточных электронных пучков. Для повышения уровня выходной мощности необходимо проведение дополнительных теоретических и экспериментальных исследований по оптимизации параметров экспериментального образца умножителя.

ЛИТЕРАТУРА

[1] Релятивистская высокочастотная электроника: Матер. II Всесоюзн. семинара. Горький (ИПФ АН СССР), 1981. Вып. 2. [2] Бугаев С. П., Канавец В. И., Климов А. И. и др.//Радиотехн. и электроника. 1987. **32**, № 7. С. 1488. [3] Александров А. Ф., Галузо С. Ю., Канавец В. И. и др.//Тез. докл. 4-й Всесоюз. симп. по сильноточной электронике. Томск, 1982. Ч. 2. С. 152. [4] Александров А. Ф., Власов А. Н., Галузо С. Ю. и др.//Релятивистская высокочастотная электроника: Матер. III Всесоюз. семинара. Горький (ИПФ АН СССР), 1983. Вып. 3. С. 96. [5] Bates D. J., Ginston E. L.//PIRE. 1957. N 7. P. 938. [6] Канавец В. И.//Вестн. Моск. ун-та. Физ. Астрон. 1961. № 2. С. 34. [7] Бурнейка К. П., Григоренко Л. П., Канавец В. И.//Электронная техника. Сер. 1, Электроника СВЧ. 1970. № 5. С. 73. [8] Бурнейка К. П., Канавец В. И., Ни Н. П., Сандалов А. Н.//Электронная техника. Сер. 1, Электроника СВЧ. 1970. № 6. С. 31. [9] Александров А. Ф., Галузо С. Ю., Канавец В. И. и др.//ЖТФ. 1980. **50**, № 11. С. 2381. [10] Модули и программное обеспечение систем автоматизации экспериментальных исследований/Под ред. С. Г. Басиладзе. М. (МГУ), 1990. Гл. IV, раздел 2. [11] Александров А. Ф., Галузо С. Ю., Кузнецов А. М.//Вестн. Моск. ун-та. Физ. Астрон. 1992. **33**, № 5. С. 82.

Поступила в редакцию
23.11.92