

РЕЛЯТИВИСТСКИЙ ЧЕРЕНКОВСКИЙ ГЕНЕРАТОР
МИЛЛИМЕТРОВОГО ИЗЛУЧЕНИЯ
СО СТЕРЖНЕВЫМ РЕЗОНАТОРОМН.И. Гунина, С.Д. Коровин,
С.Д. Полевин, А.М. Ройтман,
В.Я. Христенко

Как показал ряд недавних экспериментов [1, 2], для создания мощных источников когерентного излучения в субмиллиметровом и миллиметровом диапазонах эффективно могут быть использованы релятивистские черенковские генераторы со сверхразмерными электродинамическими системами (ЭДС). Переход к сверхразмерным ЭДС в черенковских генераторах обусловлен как необходимостью уменьшения напряженности электрических полей на поверхности замедляющей структуры во избежание ее СВЧ-пробоя [3, 4], так и возможностью использования для генерации СВЧ-излучения сильноточных пучков с большим поперечным размером, что позволяет существенно повысить мощность генераторов.

В статье приводятся результаты экспериментов по исследованию черенковского генератора миллиметрового диапазона, в котором в качестве замедляющей структуры и резонатора использован отрезок гофрированного стержня, вдоль поверхности которого могут распространяться замедленные волны. Вблизи полосы непрозрачности (\mathcal{N} -вида) гофрированный стержень обладает резонансными свойствами, за счет чего в генераторе обеспечивается распределенная обратная связь. Причем спектр колебаний гофрированного стержня существенно реже спектра колебаний отрезка волновода с близкими размерами, что позволяет успешно решить вопросы, связанные с селекцией типов колебаний в генераторе при $D/\lambda \simeq 5$ (где D - поперечный размер стержня, λ - длина волны излучения).

Эксперименты проводились на сильноточном ускорителе „Синус-6-Л“ [5], обеспечивающем следующие параметры электронного пучка: энергия электронов до 700 кэВ, ток до 8 кА, длительность импульса 25 нс.

Пучок формировался в коаксиальном вакуумном диоде со взрывоземиссионным графитовым катодом и далее транспортировался в сильном магнитном поле вблизи замедляющей структуры и оседал на коллектор. Магнитное поле создавалось импульсным соленоидом и могло изменяться в пределах 1–30 кЭ. Возбуждаемая пучком поверхностная волна, распространяющаяся вдоль поверхности стержня, преобразовывалась коническим преобразователем в объемную и затем выводилась в атмосферу через вакуумное окно. Мощность излучения измерялась детекторами на „горячих“ носителях и калориметрами, длина волны - отсечкой запредельными волноводами. Визуальный контроль за диаграммой направленности и модовым составом осуществлялся по свечению газоразрядного табло (см. рис. 1).

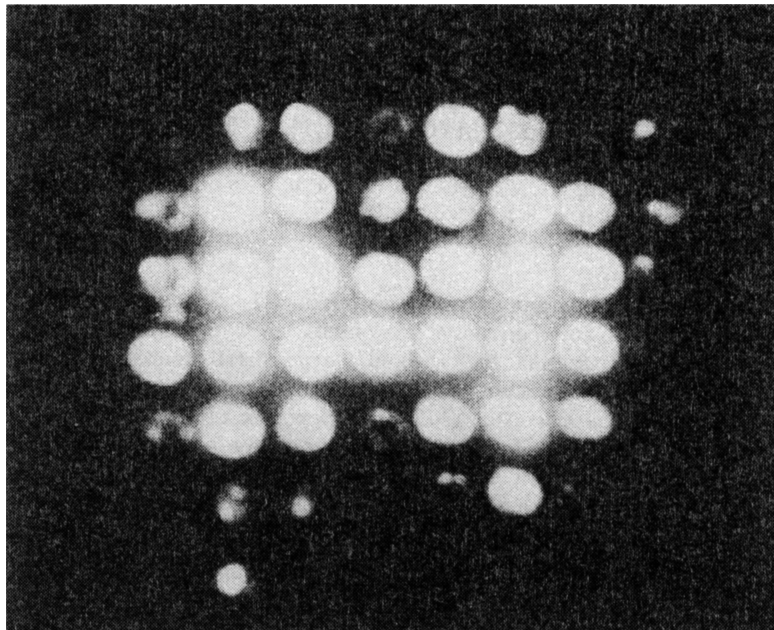


Рис. 1. Фотография свечения газоразрядного табло под действием излучения 4 мм генератора. Мода с азимутальным индексом $m = 1$.

Амплитуда гофрировки стержня выбиралась таким образом, чтобы в синхронизме с электронами пучка могли находиться замедленные волны с азимутальными индексами 0, 1, 2. Относительная длина генератора варьировалась вблизи оптимального значения $\frac{L}{\lambda} \approx \gamma^2$. Стартовый ток генератора [6] с учетом синусоидального продольного распределения синхронного поля определяется выражением

$$I_{st} \approx A \frac{mc^3}{e} (\beta\gamma)^6 \frac{\lambda R_b}{16\pi Q_m L^2} e^{\frac{4\pi}{\lambda\beta\gamma}(R_b - R)},$$

где $\frac{mc^3}{e} \approx 17$ кА, βc - продольная скорость электронов, $\gamma = (1 - \beta^2)^{-1/2}$, Q_m - добротность m -го колебания, R_b и R радиусы пучка и стержня, $A_{min} = 0.5 \cdot 10^2$. В экспериментах $I_{st} \approx 1$ кА.

На модели ЭДС генератора были проведены "холодные" измерения ее резонансных характеристик. Вблизи \mathcal{P} -вида отрезок гофрированного стержня имеет добротные колебания. Моды с различными азимутальными индексами обладают примерно одинаковыми добротностями $Q_m \approx 600$.

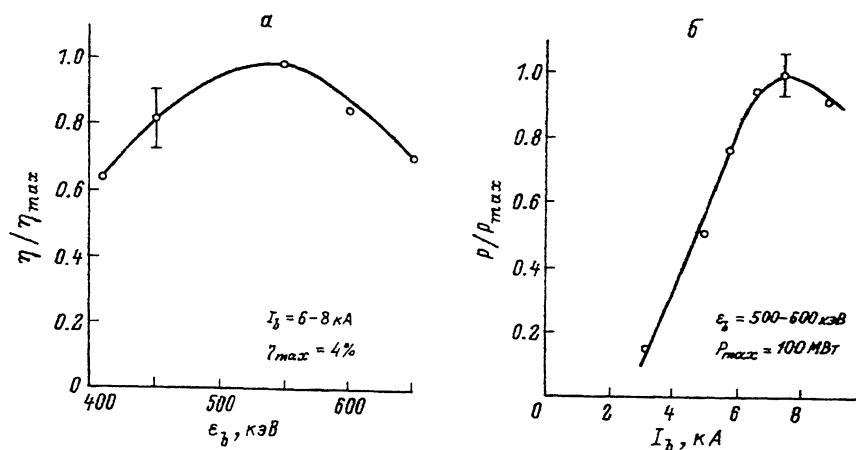


Рис. 2. Зависимость мощности излучения СВЧ-генератора от энергии электронов (а) и тока пучка (б).

При возбуждении генератора с длиной замедляющей структуры около 15 периодов в полосе усиления оказывалось сразу несколько мод, что приводило к его нестабильной работе. Сигнал СВЧ-излучения имел изрезанную форму. Свечение газоразрядного табло носило нерегулярный характер. Для обеспечения одномодовой генерации в стержне были прорезаны две продольные щели шириной около половины длины волны. В спектре колебаний выделилась мода с азимутальным индексом $m = 1$, ее добротность упала незначительно, добротности соседних „паразитных“ мод уменьшились более чем в два раза. Этого оказалось достаточно для обеспечения эффективной селекции мод в генераторе. При изменении энергии электронов от 400 до 700 кэВ осуществлялась одномодовая генерация.

Было изготовлено два подобных генератора на длину волны 4 мм и 8 мм. Зависимость мощности излучения от энергии электронов носила резонансный характер (см. рис. 2,а). Ширина резонанса по полувысоте около 20%, что соответствует 5% изменению продольной скорости электронов и согласуется с теоретической оценкой полосы усиления $\Delta\omega/\omega \sim \lambda/L$.

В диапазоне магнитных полей $H = 10-30 \text{ кЭ}$ мощность излучения практически не зависела от величины транспортирующего магнитного поля. Спад при полях меньше 10 кЭ был обусловлен ухудшением качества транспортировки пучка.

На рис. 2,б отображена зависимость мощности излучения генератора от тока пучка. Она имеет типичный вид кривой с насыщением. В оптимуме мощность излучения достигала 100 МВт при КПД $\approx 4\%$ для генератора с длиной волны $\lambda = 4 \text{ мм}$ и 150 МВт при КПД $\approx \approx 6\%$ для генератора с $\lambda = 8 \text{ мм}$. Длительность СВЧ-импульсов составляла $10 \pm 15 \text{ нс}$.

Таким образом, в результате проведенных экспериментов создан одномодовый генератор миллиметрового диапазона с высокоселективным резонатором в виде отрезка гофрированного стержня. В коротковолновой части миллиметрового диапазона достигнут рекордно высокий уровень мощности когерентного излучения.

Л и т е р а т у р а

- [1] Bratman V.L., Denisov G.G., Ofitserov M.M., Korovin S.D., Polevin S.D., Rostov V.V. - IEEE Transactions of Plasma Science, 1987, v. 15, N 1, p. 2-15.
- [2] Bratman V.L., Denisov G.G., Kol'chugin B.D., Korovin S.D., Polevin S.D., Rostov V.V. - International Journal of Infrared and Millimeter Waves, 1984, v. 5, N 9, p. 1311-1331.
- [3] Ельчанинов А.С., Загулов Ф.Я., Корovin С.Д., Месяц Г.А., Ростов В.В. - Письма в ЖТФ, 1981, т. 6, в. 19, с. 1168-1171.
- [4] Александров А.Ф., Бляхман Л.Г., Галузо С.Ю., Нечаев В.Е. - В кн.: Релятивистская высокочастотная электроника, Горький: ИПФ АН СССР, 1983, с. 219-240.
- [5] Ельчанинов А.С., Загулов Ф.Я., Корovin С.Д., Месяц Г.А., Ростов В.В. В кн.: Релятивистская высокочастотная электроника. Проблемы повышения мощности и частоты излучения, Горький: ИПФ АН СССР, 1981, с. 5-21.
- [6] Братман В.Л., Гинзбург Н.С., Ковалев Н.Ф., Нусинович Г.С., Петелин М.И. В кн.: Релятивистская высокочастотная электроника, Горький: ИПФ АН СССР, 1978, с. 249-274.

Институт сильноточной
электроники СО АН СССР,
Томск

Поступило в Редакцию
21 марта 1988 г.