

ГЕНЕРАЦИЯ МОЩНЫХ ИМПУЛЬСОВ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ ПОТОКОМ РЕЛЯТИВИСТСКИХ ЭЛЕКТРОНОВ

*Н. Ф. Ковалев, М. И. Петелин, М. Д. Райзер,
А. В. Сморгонский, Л. Э. Цопп*

Описаны результаты экспериментального исследования индуцированного черенковского возбуждения электромагнитного излучения сантиметрового диапазона потоком релятивистских электронов от сильноточного ускорителя электронов. Коэффициент преобразования энергии электронов в электромагнитное излучение составляет 12 – 15%.

Существенное повышение мощности источников электромагнитного излучения, основанных на взаимодействии электромагнитных волн с электронными потоками, возможно лишь при согласованном увеличении

энергии электронов и интенсивности электронных пучков. Для этой цели весьма привлекательным представляется использование сильноточных импульсных ускорителей с энергиями электронов $\sim 1 \div 10 \text{ Мэв}$ и токами $0,01 \div 1 \text{ Ма}$ [1 – 3].

Некоторые варианты устройств, основанных на индуцированном черенковском, переходном и тормозном излучении электронов, позволяющие осуществлять эффективное – с коэффициентами порядка 0,1 – преобразование энергии электронных потоков в энергию электромагнитных колебаний при релятивистских, в частности, ультрарелятивистских скоростях электронов, были исследованы теоретически в [4, 5]. Здесь описан эксперимент с одним из простейших устройств, основанном на индуцированном черенковском излучении электронов – автогенератором, в котором прямолинейный электронный поток взаимодействует с синхронной пространственной гармоникой электромагнитной волны, имеющей групповую скорость, противоположную направлению движения электронов ¹⁾: электромагнитная волна с необходимыми дисперсионными и поляризационными характеристиками формируется в волноводе с гофрированными стенками.

Элементы теории генератора. В ультрарелятивистском приближении (полная энергия электронов ϵ много больше их энергии покоя ϵ_0) согласно [4] оптимальным является следующее соотношение параметров системы:

$$L/\lambda \sim \epsilon^2/\epsilon_0^2,$$

$$lQ\epsilon^2 \sim 2 \cdot 10^4 (S/\lambda^2)(\epsilon_0/\epsilon).$$

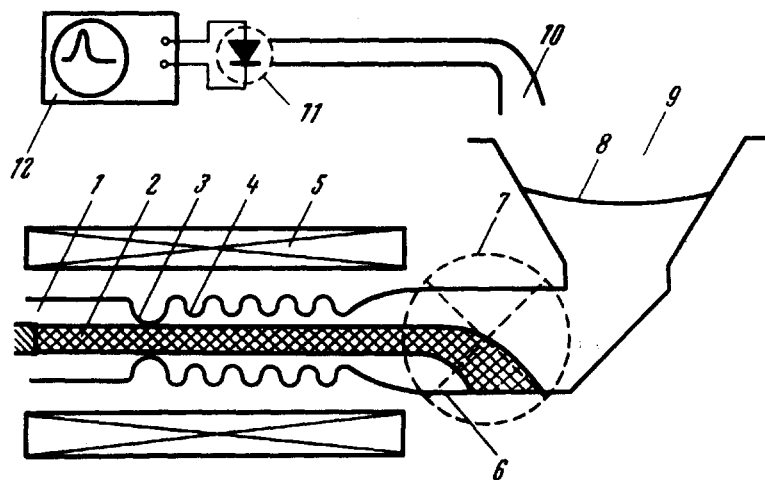
Здесь λ – рабочая длина волны) $L, S, Q = 2\pi(L/\lambda)(c/v_{\text{Гр}})$ – длина, сечение и эффективная добротность рабочего пространства, c – скорость света, $v_{\text{Гр}}$ – групповая скорость волны, ϵ^2 – отношение квадрата амплитуды продольной составляющей электрического поля синхронной гармоники к среднему квадрату поля волны, l – электронный ток в амперах.

Поперечные размеры волновода и период гофры необходимо подбирать из соображений получения устойчивой одночастотной генерации, В описываемом ниже экспериментальном генераторе в полосе синхронизма между электронами и бегущими волнами наряду с рабочей модой E_{01} находилась мода E_{02} , но условие самовозбуждения последней вследствие малости параметра ϵ^2 не выполнялось.

Конструктивные особенности экспериментального генератора. Источником электронов в генераторе (см. рисунок) служил сильноточный ускоритель 1, описанный в [2]. Фокусировка электронного потока 2 осуществлялась квазистационарным магнитным полем импульсного соленоида 5, которое изменялось от $2 \cdot 10^3$ до $5 \cdot 10^3$ э. Так как

1) Аналогичный механизм, обеспечивающий распределенную внутреннюю обратную связь, используется в лампе с обратной волной (картинотроне).

электромагнитное излучение представлялось удобным выводить в направлении движения электронов, то рабочее пространство генератора – гофрированный волновод 4 – было отделено от области, примыкающей к инжектору, сужением 3, запердельным для волны E_{01} . Волна, отраженная от сужения, практически не взаимодействуя с электронным пучком, проходила через гофрированный волновод 4, плавный согласованный переход 5, сверхразмерный волновод с изломом, затем из рупора 9 через слюдяное вакуумное окно 8 излучалась в свободное пространство. Излом волновода, а также специальный отклоняющий импульсный соленоид 7 исключали возможность попадания на окно электронов и продуктов разрушения катода. Давление остаточного газа в вакуумном объеме не превышало $2 \cdot 10^{-5}$ тор.



Принципиальная схема экспериментальной установки

Методика измерений. Параметры электронного потока – распределение электронов по энергиям и плотности тока по сечению пучка – определялись методами, описанными в [6]. Система измерения высокочастотной мощности состояла из приемного рупора 10 (с размерами, достаточно малыми, чтобы исключить существенные отражения излучаемой волны), одномодового волновода, объемного, охлаждаемого жидким азотом, германиевого детектора 11, допускающего большие перегрузки, и скоростного осциллографа 12. Чувствительность детектора по отношению к мощности, распространяющейся в выходном волноводе генератора в виде волны E_{01} , определялась посредством специального калибровочного комплекса. Частота излучения измерялась сменными фильтрами (каждый с полосой 5%), помещавшимися перед детектором. Измерения распределения поля на апер-

туре выходного рупора осуществлялись путем перемещений и поворотов приемного рупора, связанного с детектором гибким диэлектрическим волноводом.

Результаты эксперимента. Исследования проводились в таком режиме работы ускорителя [6], когда кинетическая энергия электронов составляла 670 ± 70 кэв. Структура поля излучения соответствовала рабочей моде E_{01} , длина волны излучения равнялась $3,1 \pm 0,1$ см, длительность импульса на уровне половины от максимальной мощности составляла около 10 нсек.

Наибольший коэффициент преобразования энергии электронов в электромагнитное излучение в удовлетворительном согласии с расчетом достигал $\sim 12 \div 15\%$.

Авторы благодарны А.В.Гапонову и М.С.Рабиновичу за постановку проблемы, внимание к работе и ценные советы, А.А.Андронову, А.А.Рухадзе и В.К.Юлпатову за полезные дискуссии и П.В.Бубнову, В.И.Пулину и Г.В.Самышеву за помощь в работе.

Физический институт
им. П.Н.Лебедева
Академии наук СССР

Поступила в редакцию
10 июля 1973 г.

Литература

- [1] S.E.Graybill, S.V.Nablo. IEEE Trans. on Nucl. Sci., 14, 782, 1967; P.Wildi, A.Kolb. IEEE Trans. on Nucl. Sci., S-18, 163, 1971.
- [2] А.А.Рухадзе. Вестник АН СССР, № 1, 1972; Г.П.Мхеидзе, М.Д.Райзер. Сб. Краткие сообщения по физике (ФИАН), № 4, 41, 1972.
- [3] I.A.Nation. Appl. Phys. Lett., 17, № 11, 1970; M.Friedman, M.Hemdon. Phys. Rev. Lett., 28, 210, 1972; А.К.Березин, А.Б.Файнберг, Л.И.Болотин, А.М.Егоров, В.А.Киселев, В.А.Буц, В.И.Курилко, А.П.Толстолужский. ЖЭТФ, 63, 861, 1972; M.Friedman, D.Hammer. Appl. Phys. Lett., 21, 204, 1972.
- [4] М.И.Петелин. Изв. высш. уч. зав., сер. Радиофизика, 13, 1586, 1970.
- [5] В.К.Юлпатов. Изв. высш. уч. зав., сер. Радиофизика, 13, 1784, 1970; А.В.Сморгонский. Изв. высш. уч. зав., сер. Радиофизика, 16, № 1, 1973; М.И.Петелин, А.В.Сморгонский. Изв. высш. уч. зав., сер. Радиофизика, 16, № 2, 1973.
- [6] Г.П.Мхеидзе, В.И.Пулин, М.Д.Райзер, Л.Э.Цопп. ЖЭТФ, 63, 104, 1972.