

## МИКРОВОЛНОВОЕ ИЗЛУЧЕНИЕ ПРИ ВЗАИМОДЕЙСТВИИ СИЛЬНОТОЧНОГО РЕЛЯТИВИСТСКОГО ПУЧКА МИКРОСЕКУНДНОЙ ДЛИТЕЛЬНОСТИ С ПРОСТРАНСТВЕННО-ПЕРИОДИЧЕСКИМ МАГНИТНЫМ ПОЛЕМ

Ю.В.Ткач, Я.Б.Файнберг, Н.П.Гадецкий, Е.А.Лемберг,  
В.В.Дятлова, В.В.Ермоленко, А.В.Сидельникова

В работе приведены результаты исследований микроволнового излучения сильноточного релятивистского пучка микросекундной длительности с током  $3 \text{ ка}$ , энергией  $230 \text{ кэв}$  и длительностью  $1,2 \cdot 10^{-6} \text{ сек}$ . Показано, что при инъекции кольцевого пучка с такими параметрами в пространственно-периодическое магнитное поле наблюдается СВЧ излучение с мощностью несколько мегаватт.

Использование сильноточных релятивистских пучков позволило получить микроволновое излучение с уровнем мощности  $10^9 \text{ вт}$  при длительности  $5 \cdot 10^{-8} \text{ сек}$  [1]. Однако, иногда, необходимо создание генераторов СВЧ излучения с мощностью  $10^8 - 10^9 \text{ вт}$  и длительностью импульса  $10^{-6} \div 10^{-5} \text{ сек}$ . Получение микроволнового излучения с такими параметрами сопряжено с рядом трудностей. Одна из них состоит в отсутствии инжекторов, способных формировать, пригодные для получения генерации, сильноточные релятивистские пучки большой длительности, хотя в настоящее время в этом направлении достигнуты некоторые успехи [2, 3]. Другая трудность состоит в следующем. При уровнях мощности  $10^8 - 10^9 \text{ вт}$  напряженность СВЧ полей достигает  $10^6 \text{ в/см}$ , а длительность импульса излучения достаточна для развития лавины. В этих условиях за счет газовой выделенности из стенок и ионизации газа электронами, возникающими при автоэлектронной эмиссии в СВЧ полях, даже в условиях высокого вакуума, в генерирующей области развивается высокочастотный пробой. Этот пробой, собственно, и ограничивает уровень мощности генерации. Именно это обстоятельство заставляет при больших уровнях высокочастотной мощности и больших длительностях переходить к генераторам, которые позволяют избежать ВЧ пробоя при больших потоках мощности. В данной работе исследуется один из видов таких генераторов [1, 4], основанный на взаимодействии сильноточного пространственно-модулированного релятивистского пучка большой длительности с быстрыми волнами в круглом волноводе.

Генерация была получена на установке, схема которой приведена на рис. 1. В качестве инжектора использовалась пушка магнетронного типа с холодным катодом. Выбор пушки такого типа обусловлен следующими соображениями. Длительность импульса релятивистского пучка определяется временем закорачивания промежутка анод-катод плазмой, поступающей из катодных и анодных факелов. Увеличение времени закорачивания и, следовательно, увеличение длительности релятивистского пучка можно получить, уменьшая число электронов, попадающих на анод, и снижая скорость распространения катодной плазмы. Наиболее полно эти два условия одновременно реализуются в пушке магнет-

ронного типа. В нашей установке использовалась пушка магнетронного типа, питаемая от генератора Маркса, формирующего импульс напряжения амплитудой до  $300 \text{ кВ}$  при длительности  $1,2 \cdot 10^{-6} \text{ сек}$  и помещенная в магнитное поле, напряженность которого могла достигать  $18 \text{ кЭ}$ . Напряженность электрического поля в пушке достигала  $150 \text{ кВ/см}$ .

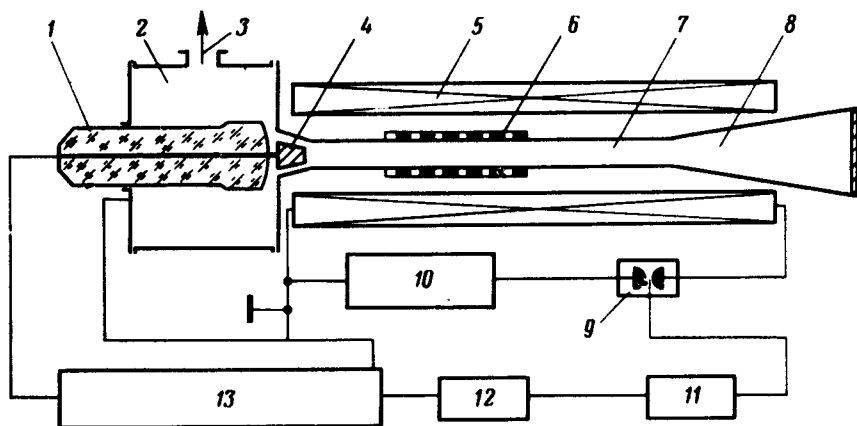


Рис. 1. Блок-схема установки: 1.— изолятор, 2 — камера пушки, 3 — вакуумпровод, 4.— катод пушки, 5 — соленоид, 6 — периодическая структура, 7.— волновод, 8 — рупор, 9 — разрядник, 10 — батарея конденсаторов, 12 — регулируемая задержка, 13 — ГИН

Наложение внешнего поля, подбор его конфигурации и напряженности на катоде позволили существенно снизить скорость движения плазмы, закорачивающей диод. Кривая, иллюстрирующая эффективность магнитной изоляции, приведена на рис. 2. Видно, что наложение продольного внешнего магнитного поля существенно снижает скорость движения плазмы вплоть до значений  $(1,5 - 2) \cdot 10^6 \text{ см/сек}$ . Скорость движения плазмы вычислялась по известному расстоянию анод-катод и по измеренному времени закорачивания. Время закорачивания определялось экспериментально по длительности импульса жесткого рентгеновского излучения из области анода, снимаемого с датчика ЭЛУ-ФТ и обладающего временным разрешением  $10^{-9} \text{ сек}$ .

Описанная пушка формировала кольцевой электронный пучок с шириной кольца  $2 - 3 \text{ мм}$  и током  $3 \text{ кА}$ . Ток пушки измерялся с помощью шунтов и цилиндра Фарадея, на вывод которого одевался пояс Роговского. Энергия частиц вычислялась по спектру тормозного рентгеновского излучения при торможении пучка на мишени и достигала  $230 \text{ кэВ}$  при напряжении на зонде пушки  $250 \text{ кВ}$ . Сформированный кольцевой пучок с внешним диаметром  $37 - 38 \text{ мм}$  инжестировался в круглый волновод диаметром  $49 \text{ мм}$ , помещенный в пространственно-периодическое магнитное поле, меняющееся вдоль оси волновода по закону

$$H(z) = H_0 [1 + \alpha \sin(2\pi/L)z], \quad (1)$$

где  $L$  — период модуляции магнитного поля. Модуляция осуществлялась с помощью структуры, состоящей из чередующихся железных и

алюминиевых колец. В наших экспериментах длина промодулированного участка равнялась 24 см, глубина модуляции составляла 5 – 6%. Затем следовала область дрейфа в однородном магнитном поле.

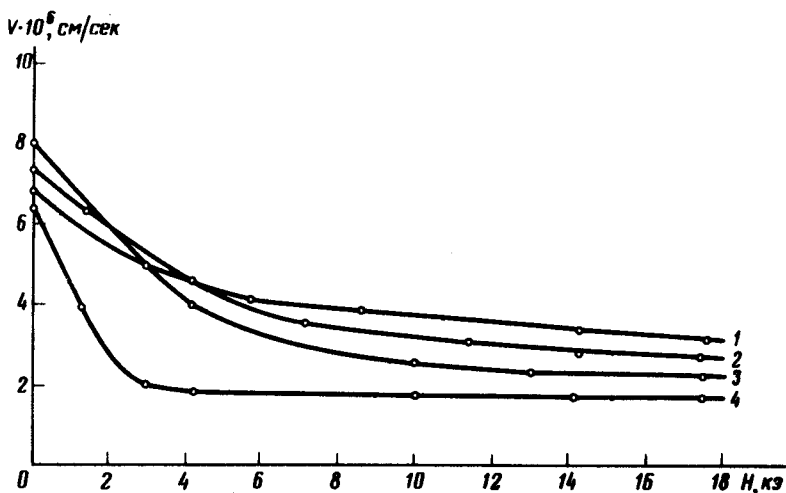


Рис. 2. Изменение скорости закорачивания диода от  $H$  поля (1 — угол конусности катода  $\alpha = 18^\circ$ , длина катода  $L = 2$  см, зазор  $d = 2$  см; 2 —  $\alpha = 18^\circ$ ,  $L = 8$  см;  $d = 1$  см; 3 —  $\alpha = 54^\circ$ ,  $L = 5$  см;  $d = 2$  см; 4 —  $\alpha = 18^\circ$ ,  $L = 2$  см,  $d = 1,2$  см)

Генерация наблюдалась при взаимодействии циклотронных волн и волн пространственного заряда, промодулированного таким образом пучка, с быстрыми волнами типа  $H_{01}$  и  $E_{11}$  в круглом волноводе. Взаимодействие волн, распространяющихся в пространственно-промодулированном пучке с волноводными типами колебаний возможно, если выполняются соотношения [1]

$$\begin{aligned} (k + K) V_{||} - \Omega_c &= (k^2 c^2 + \omega_{кр}^2)^{1/2}, \\ (k + K) V_{||} - \omega_b^* &= (k^2 c^2 + \omega_{кр}^2)^{1/2}. \end{aligned} \quad (2)$$

Здесь  $\Omega_c$  и  $\omega_b^*$  — электронная циклотронная и приведенная плазменная частота пучка соответственно,  $\omega_{кр}$  — частота отсечки волновода,  $V_{||}$  — продольная составляющая скорости электронов,  $K = 2\pi/L$ . При этом генерация наблюдается на частоте

$$\omega = [\Omega_c / (1 - \beta^2)] [1 \mp \beta \sqrt{1 - (1 - \beta^2) (\omega_{кр}^2 / \Omega_c^2)}]. \quad (3)$$

Максимальная мощность генерации была получена при  $\lambda \approx 3$  см и  $L = 3$  см, напряженность магнитного поля 6 кэ и достигала несколько мегаватт при длительности импульса по полувысоте 0,6 – 0,7 мксек. Вывод мощности осуществлялся с помощью вакуумированного рупора, выходное сечение которого равнялось 79 см<sup>2</sup>. На рис. 3 приведена осциллограмма импульса генерации, тока пучка и рентгеновского излучения из области анода пушки. Мощность СВЧ генерации измерялась с

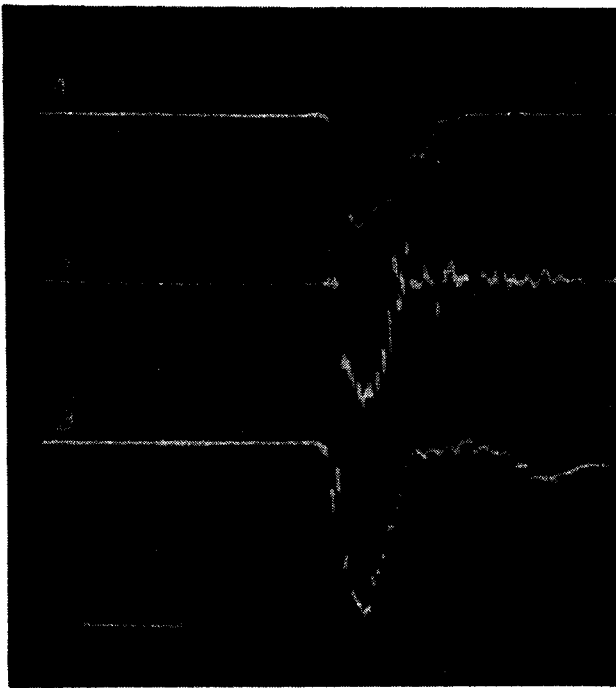


Рис. 3. Осциллограммы импульсов СВЧ генерации, тока пучка и рентгеновского излучения

помощью волноводного калориметрического датчика с постоянной времени не хуже  $5 \cdot 10^{-8}$  сек, излучение на вход которого подавалось после калиброванного ослабления. По измеренной энергии и длительности импульса излучения (с учетом ослабления) вычислялась мощность генерации в предположении о маломодовом режиме генерации.

Физико-технический институт  
Академии наук Украинской ССР

Поступила в редакцию  
11 июня 1975 г.

### Литература

- [1] V.J. Granatstein, M. Herndon, Y. Carmell, J.A. Nation. Bull. Amer. Phys. Soc., 18, 1354, 1973.; Plasma Physics, 17, 23, 1975.
- [2] С.П. Бугаев, Г.М. Кассиров, Б.М. Ковальчук, Г.А. Месяц. Письма в ЖЭТФ, 18, 82, 1973.
- [3] Л.В. Дубовой, И.М. Ройфе, Е.В. Середенко, Б.А. Стекольников. Препринт ЮТ-5, НИИЭФА им. Д.В. Ефремова, Ленинград, 1974.
- [4] M. Friedman, M. Herndon. Phys. Rev. Lett., 28, 210, 1972.