

02;09;10

Релятивистский черенковский СВЧ-генератор без внешнего магнитного поля

© А.И. Климов, С.Д. Коровин, В.В. Ростов, Е.М. Тотьменинов

Институт сильноточной электроники СО РАН, Томск

E-mail: totm@lfe.hcei.tsc.ru

Поступило в Редакцию 14 мая 2005 г.

В окончательной редакции 10 сентября 2005 г.

Исследован релятивистский черенковский СВЧ-генератор, в котором сплошной цилиндрический электронный пучок распространяется через короткую ($L \approx 3\lambda$, где λ — длина волны) резонансную замедляющую систему в отсутствие внешнего магнитного поля. Модуляция пучка по энергии на входе в пространство взаимодействия обеспечивает условие для энергообмена при фазовой скорости волны, превышающей скорость электронов. Эффективная связь с пучком обеспечивается за счет близкого к равномерному распределению продольной компоненты электрического поля синхронной волны по поперечному сечению пространства взаимодействия. В эксперименте достигнуто преобразование мощности из сильноточного электронного пучка в электромагнитное излучение моды E_{01} с эффективностью около 8% при мощности 1.2 ± 0.3 GW и частоте генерации 4.05 GHz.

PACS: 41.60.Bq, 84.30.Hg

Эффективное взаимодействие между электронным пучком и электромагнитной волной осуществляется при условии черенковского синхронизма [1] $V_{e,0} \approx V_{ph}$ ($V_{e,0}$ — начальная продольная скорость электронов пучка, V_{ph} — фазовая скорость синхронной волны или ее пространственной гармоники), реализуется, как правило, при положительной кинематической расстройке синхронизма $\delta_0 = (1/V_{ph} - 1/V_{e,0})c$, где c — скорость света, т.е. при $V_{ph} < V_{e,0}$. В релятивистской области энергий электронов для замедления волны ($V_{ph} < c$) используются замедляющие системы (ЗС) в виде гофрированного волновода, в котором поле синхронной пространственной гармоники прижато к поверхности гофрировки по закону $E_z(r) \sim \exp(kcr\sqrt{V_{ph}^{-2} - c^2})$. Здесь

r — радиальная координата, $k = 2\pi/\lambda$. Для транспортировки пучка вдоль пространства взаимодействия используют внешнее магнитное поле. Необходимо отметить, что возбуждение колебаний теоретически возможно и при отрицательной начальной кинематической расстройке синхронизма ($V_{ph} > c$) в монотроне даже в отсутствие замедляющей системы [2], однако данный режим характеризуется высоким значением стартового тока генератора, что фактически препятствовало экспериментальной реализации прибора.

Ранее было показано, что при наличии модуляции электронного потока по энергии на входе релятивистского черенковского генератора стартовая расстройка синхронизма приближается к нулю, когда в начале пространства взаимодействия центральный электрон формирующегося сгустка располагается в тормозящей фазе поля синхронной гармоники вблизи границы перехода к ускоряющей фазе поля (фаза модуляции $\approx \pi$) [3]. С ростом глубины модуляции расстройка переходит в область отрицательных значений. При этом первый положительный максимум активной составляющей восприимчивости электронного потока ($-\varphi'$) [4] смещается в область отрицательных значений кинематического угла пролета $v_{kin} = \delta_0 \xi_k$, где $\xi_k = kL$, L — длина пространства взаимодействия (рис. 1). Максимуму $-\varphi'$ соответствует близкое к нулю значение $|v_{kin,opr}| \approx (0.1 \div 0.2)\pi$, которое практически не меняется с дальнейшим ростом глубины модуляции. Таким образом, и при отрицательной начальной кинематической расстройке синхронизма возможен режим с низким стартовым током генератора. Также было показано [3], что вблизи фазы модуляции $\approx \pi$ эффективность черенковского генератора может достигать высоких значений.

Рассмотренные выше предпосылки создают условия для эффективной генерации при фазовой скорости синхронной гармоники, превышающей скорость электронов. Для реализации режима генерации без ведущего магнитного поля представляется оптимальный случай $V_{ph}c$ (режим вблизи π -вида). В этом случае для основной гармоники бегущей волны распределение продольной компоненты электрического поля по поперечному сечению системы близко к равномерному. Это обеспечивает эффективную связь со сплошным цилиндрическим пучком, а наличие распределенных отражений от ЗС вблизи режима π -вида — внутреннюю обратную связь. Собственное азимутальное магнитное поле сплошного цилиндрического пучка $H_\varphi = 2I_b/cr_b$, где I_b , r_b — ток и радиус пучка соответственно, препятствует его быстрому радиальному рассеянию под влиянием сил объемного заряда $E_{pr}(r) = 2I_b r/r_b^2 V_{e,0}$

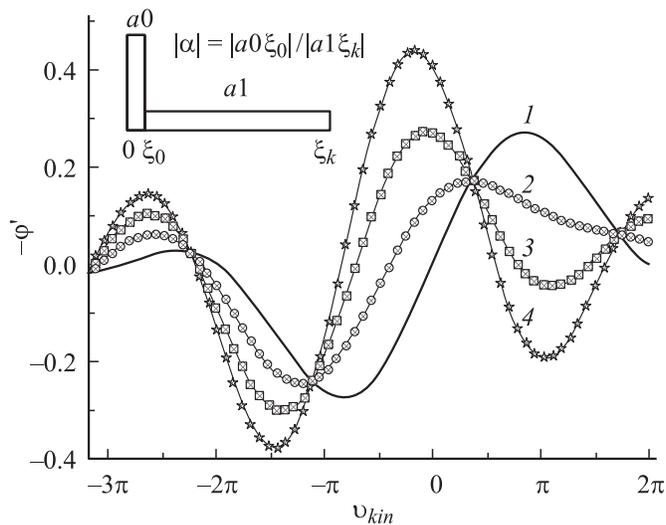


Рис. 1. Приведенные активные составляющие восприимчивости электронного потока для двухступенчатой (узкий модулирующий зазор на входе системы $\xi_0 \ll \xi_k$) фиксированной продольной структуры поля как функции кинематического угла пролета, полученные при разности фаз поля в модуляторе и на входе во вторую секцию $\approx \pi$: 1 — $|\alpha| = 0$; 2 — $|\alpha| = 0.2$; 3 — $|\alpha| = 0.4$; 4 — $|\alpha| = 0.6$.

($r < r_b$) и тем самым обеспечивает прохождение вдоль пространства взаимодействия.

Конструкция генератора включает катод К (1), анод в виде сетки С (2), участок гладкого волновода и ЗС (3, рис. 2). В исследуемой геометрии средний диаметр гофрировки приблизительно в 1.3 раза превышает длину волны излучения. Релятивистский электронный пучок из планарного диода эмитируется через анодную сетку в область пространства взаимодействия.

Для формы импульса напряжения на катоде в отсутствие внешнего магнитного поля, близкой к экспериментальной, с помощью кода KARAT [5] рассчитан режим генерации с эффективностью по мощности $\approx 30\%$ на рабочей моде E_{01} (рис. 3). Для стационарной стадии ($t \approx 35\text{--}50\text{ ns}$) расчетная мощность составила 3.1 GW с достаточно чистым спектром на частоте 3.95 GHz.

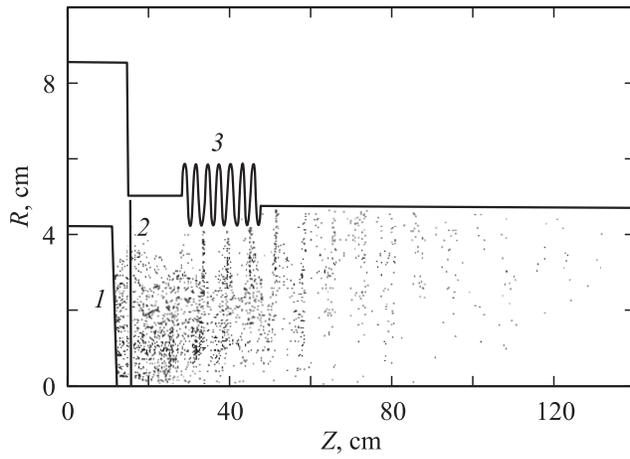


Рис. 2. Конструкция генератора: 1 — катод; 2 — сетка; 3 — замедляющая система.

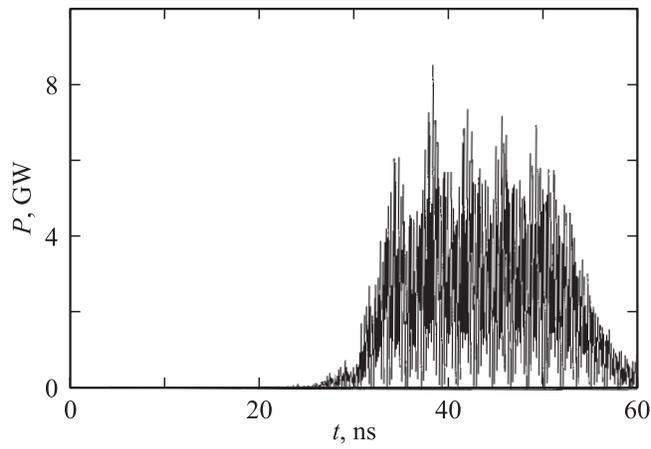


Рис. 3. Неусредненный по времени поток мощности на выходе области расчета. Параметры электронного пучка: энергия электронов 1.1 MeV, ток пучка 8.8 kA.

Исследование электродинамических характеристик расчетной геометрии генератора на рабочей частоте генерации проводилось с помощью программы на основе метода матриц рассеяния [6]. Расчеты показали, что на участке ЗС фазовая скорость основной гармоники бегущей волны E_{01} приблизительно равна скорости света. Вид „холодного“ продольного распределения поля свидетельствует о существовании стоячей волны в области между сеткой и входом в ЗС, где, по-видимому, и осуществляется эффективная модуляция электронного потока по энергии. Для участка продольного распределения поля, ограниченного сеткой и выходом ЗС, оценочное значение активной составляющей восприимчивости электронного потока с $V_{e,0} \approx 0.95c$ положительно. Холодная добротность рабочего колебания составила ≈ 30 . Анализ дисперсионной характеристики рабочей волны E_{01} для участка ЗС, полученной в приближении бесконечно длинного гофрированного волновода, показал, что рабочая точка находится вблизи расчетной частоты генерации.

Целью данной работы была экспериментальная проверка предложенной схемы релятивистского черенковского СВЧ-генератора без внешнего магнитного поля. Эксперимент основан на численном моделировании, которое предсказывает высокую эффективность данного генератора в сравнении с существующими вариантами приборов без магнитного поля (виркатор, MPO) [7,8].

Эксперимент был выполнен с использованием импульсно-периодического наносекундного ускорителя электронов „СИНУС-7“ [9], который генерировал в режиме одиночных импульсов в планарном диоде электронный пучок с током ≈ 12 кА, длительностью около 50 пс при напряжении в диоде ≈ 1.2 МВ. Для изготовления анодной сетки использовалась стальная проволока диаметром 0.2 мм. Эмиссия электронов производилась с металлodieлектрического лезвийного катода, помещенного внутрь фокусирующего электрода, изготовленного из нержавеющей стали. Мощность генерации определялась с использованием калиброванного волноводно-полоскового ответвителя. Кроме того, проводилось измерение диаграммы направленности излучения с помощью вибраторной антенны. Спектр излучения определялся гетеродинным методом путем обработки сигнала промежуточной частоты осциллографом TDS-644A с помощью аппарата быстрого преобразования Фурье. Для визуального наблюдения диаграммы направленности излучения использовалось табло из неоновых ламп.

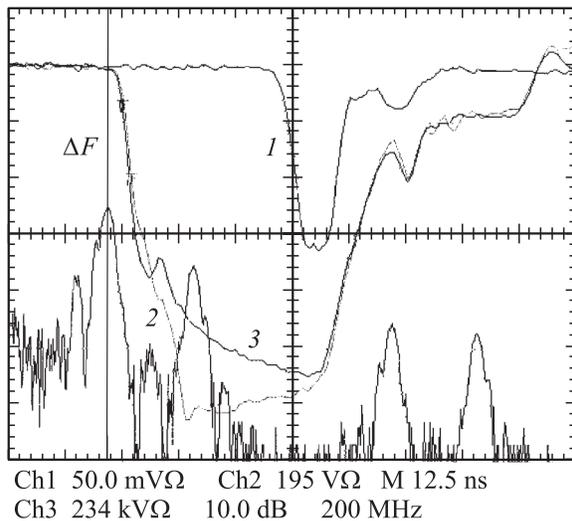


Рис. 4. 1 — протектированный СВЧ-сигнал с волноводно-полоскового ответвителя, 2 — напряжение в диоде, 3 — ток диода, ΔF — результат Фурье-преобразования сигнала с гетеродина. Частота генерации: $F_{gen} = F_{get} + \Delta F$. Ток диода ≈ 12 кА, напряжение в диоде ≈ 1.2 МВ, $F_{get} = 3.7$ GHz, $\Delta F \approx 0.35$ GHz.

При оптимальном зазоре между анодной сеткой и катодом получен режим генерации с эффективностью по мощности $\approx 8 \pm 2\%$ (рис. 4). Измеренная с помощью волноводно-полоскового ответвителя и путем интегрирования по диаграмме направленности пиковая мощность генерации составила 1.2 ± 0.3 GW на частоте 4.05 GHz. Диаграмма излучения соответствовала волне E_{01} . Ширина спектра на уровне -3 dB не превышала 100 MHz. В данном режиме максимальный разброс амплитуд микроволновых сигналов не превышал $\approx 25\%$. При отстройке от оптимального зазора происходили снижение эффективности и возрастание разброса мощности генерации от импульса к импульсу.

Наблюдаемое существенное различие между расчетной и измеренной эффективностью генератора может быть отчасти связано со спецификой формирования сплошного электронного пучка в области планарного вакуумного диода. Например, существенную роль могут играть паразитные потоки электронов с фокусирующего электрода

(в эксперименте не проводились измерения тока пучка, прошедшего через анодную сетку), особенности возникновения и функционирования эмиссионных центров на кромках лезвий катода, не оптимальный профиль поверхности катода и неоднородность распределения электрических полей вблизи анодной сетки с конечным размером ячейки. Перечисленные выше особенности, по-видимому, влияют на качество электронного пучка (например, разброс продольных скоростей), его конфигурацию в области за анодной сеткой и были также характерны для эксперимента с виркатором [7]. С другой стороны, возможно, в эксперименте требуется некоторая дополнительная оптимизация геометрии ЗС генератора.

Таким образом, в эксперименте получен режим генерации релятивистского черенковского СВЧ-генератора без внешнего магнитного поля с эффективностью $\approx 8\%$ и селективным возбуждением моды E_{01} на расчетной частоте. Основные пути, направленные на повышение эффективности генератора в эксперименте, могут быть связаны с корректировкой геометрии ЗС генератора и повышением качества сплошного цилиндрического электронного пучка.

Авторы выражают благодарность С.А. Кицанову и М.Ю. Сухову за помощь при проведении экспериментальной части работы.

Список литературы

- [1] Ковалёв Н.Ф., Петелин М.И., Райзер М.Д. и др. // Релятивистская высокочастотная электроника. Горький: ИПФ АН СССР, 1979. С. 76–113.
- [2] Юлатов В.К. // Изв. вузов. Радиофизика. 1970. Т. 13. № 12. С. 1784–1788.
- [3] Коровин С.Д., Куркан И.К., Ростов В.В. и др. // Изв. вузов. Радиофизика. 1999. Т. 42. № 12. С. 1189–1196.
- [4] Братман В.Л., Гинзбург Н.С., Ковалёв Н.Ф. и др. // Релятивистская высокочастотная электроника. Горький: ИПФ АН СССР, 1979. С. 249–274.
- [5] Tarakanov V.P. User's Manual for Code KARAT. Springfield: BRA, 1992.
- [6] Denisov G.G., Lukovnikov D.A., Samsonov S.V. // Int. J. Infrared and Millimeter Waves. 1995. V. 16. N 4. P. 745–752.
- [7] Кицанов С.А., Климов А.И., Коровин С.Д. и др. // ЖТФ. 2002. Т. 72. В. 5. С. 82–90.
- [8] Haworth M.D., Vaca G., Benford James N. et al. // IEEE Trans. Plasma. Sci. V. 26. N 3. June 1998. P. 312–319.
- [9] Коровин С.Д., Ростов В.В. // Изв. вузов. Физика. 1996. № 12. С. 21–30.