

Из формул (П.2) и (П.3) следует справедливость соотношения (9). Очевидно, что выполняется также равенство

$$\frac{\partial^2 G_e^0}{\partial u \partial u'} + \frac{\partial^2 G_h^0}{\partial v \partial v'} = \delta(\rho - \rho'). \quad (\text{П.4})$$

Формулы (9) и (П.4) являются обобщением на замкнутую область равенства

$$\frac{\partial^2 G^0}{\partial u \partial u'} + \frac{\partial^2 G^0}{\partial v \partial v'} = \delta(\rho - \rho'), \quad (\text{П.5})$$

справедливого для функции Грина G^0 двумерного уравнения Лапласа неограниченной области. Формула (П.5) использовалась в работе [2] для вычисления предела (1).

Выражаю глубокую благодарность И. М. Браверу и П. Ш. Фридбергу за ценные дискуссии по работе

ЛИТЕРАТУРА

1. Бравер И. М., Гарб Х. Л., Фридберг П. Ш. — ДАН СССР, 1985, 280, № 2, с. 357.
2. Хэнл Х., Мауэ А., Вестпфаль К. Теория дифракции — М Мир, 1964 — 428 с.
3. Левинсон И. Б., Фридберг П. Ш. — ДАН СССР, 1964, 158, № 5, с. 1064.
4. Гарб Х. Л., Фридберг П. Ш., Яковер И. М. — Литовский физ. сб., 1982, 22, № 3, с. 37.

Поступила в редакцию
25 июля 1985 г.

УДК 621.384.66.621.373.633

ИМПУЛЬСНО-ПЕРИОДИЧЕСКИЙ РЕЛЯТИВИСТСКИЙ КАРСИНОТРОН

С. Д. Коровин, В. В. Ростов, А. В. Сморгонский

1. Для решения ряда исследовательских задач представляют интерес источники мощного микроволнового излучения с малой длительностью (10^{-9} с) и большой пиковой мощностью (10^9 Вт), способные работать с высокой частотой повторения. Впервые возможность создания мощных импульсно-периодических СВЧ генераторов была продемонстрирована в работе [1]. Однако длительность импульса микроволнового излучения в [1] была относительно велика ≈ 20 нс, а низкое значение магнитного поля, использовавшегося для транспортировки сильноточного электронного пучка не позволило на длине волны ≈ 3 см превысить уровень мощности ~ 100 МВт и электронный кпд генерации $\approx 7\%$ при частоте следования импульсов 50 Гц. Ниже сообщается о результатах экспериментальных исследований, целью которых являлось повышение кпд релятивистского карсинотрона (ЛОВ) сантиметрового диапазона и укорочение длительности импульсов излучения при высокой частоте их следования.

2. В работе исследовался релятивистский карсинотрон с неоднородным («ступенчатым») вдоль направления движения пучка сопротивлением связи [2, 3], использующий черенковское взаимодействие электронов сильноточного пучка с первой обратной гармоникой волны E_{01} аксиально-симметричного плавного гофрированного волновода. Эксперименты проводились на сильноточном наносекундном ускорителе «Синус-5», который имел накопитель энергии в виде коаксиальной формирующей линии (ФЛ) с зарядным устройством на основе трансформатора Тесла, встроенного в ФЛ [4]. Формирующая линия с волновым сопротивлением $R_d = 50$ Ом и обостряющий газовый разрядник высокого давления позволяли формировать на катоде вакуумного диода высоковольтный импульс напряжения длительностью на полувывоте около 3 нс с фронтами ≈ 1 нс.

В экспериментах использовался коаксиальный вакуумный диод, катод которого помещался в однородное магнитное поле, необходимое для транспортировки сильноточного пучка через электродинамическую систему СВЧ генератора (рис. 1). Катодом служил тонкостенный графитовый цилиндр, что давало возможность обеспечить малое время развития процессов взрывной эмиссии электронов, о чем свидетельствуют осциллограммы тока пучка и напряжения на катоде, приведенные на рис. 2(а, б).

При выборе импеданса вакуумного диода (R_d) учитывалось, что в черенковских приборах прямолинейный трубчатый электронный пучок не может быть пропущен сколь угодно близко к металлической стенке волновода, что связано с конечностью амплитуды гофрировки электродинамической системы генератора, с наличием запредельного сужения и т. д. Это приводит к тому, что кинетическая энергия частиц в пространстве взаимодействия оказывается равной $W = e(\varphi_k - I_b \rho_0)$, где φ_k — потенциал катода,

I_b — ток пучка, $\rho_0 = (60/\beta_{||}) \ln(r/r_b)$, $\beta_{||} = v_{||}/c$, $v_{||}$ — продольная скорость электронов, r — средний радиус волновода, r_b — радиус пучка, e — заряд электрона. Таким образом, коэффициент передачи энергии, накопленной в формирующей линии ускорителя, в кинетическую энергию пучка, без учета потерь в разряднике, имеет вид

$$\chi = 4 \frac{\rho_L (R_d - \rho_0)}{(R_d + \rho_L)^2}. \quad (1)$$

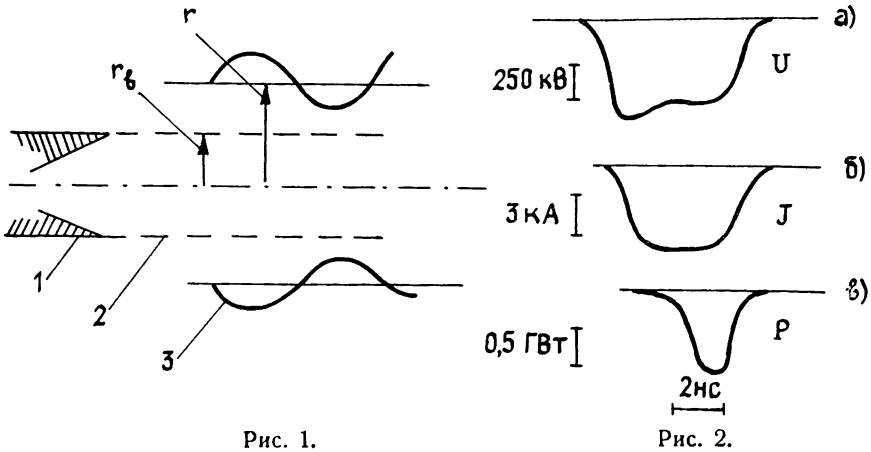


Рис. 1.

Рис. 2.

Рис. 1 Конфигурация электронной пушки

1 — катод, 2 — электронный пучок, 3 — электродинамическая система генератора.

Рис. 2. Осциллограммы напряжения на катоде (а), тока пучка (б) и напряжения на СВЧ детекторе (в).

Из (1) видно, что χ близок к единице лишь при условии $\rho_L \sim R_d \gg \rho_0$. В проведенных экспериментах $\rho_0 \approx 15-20$ Ом, а величина R_d была выбрана ≈ 100 Ом. Для обеспечения согласования вакуумного диода и ФЛ ускорителя было предложено использовать адиабатический трансформатор в виде длинной коаксиальной передающей линии с масляным заполнением, в которой волновое сопротивление за счет уменьшения диаметра центрального проводника плавно повышалось от 50 до 100 Ом. Наличие передающей линии позволило получить на катоде вакуумного диода $\varphi_k \approx 600$ кэВ и ток пучка $I_b \approx 5-6$ кА без существенного рассогласования системы

3. Геометрия карсинотрона была, в основном, аналогична выбранной в работе [3]. В то же время было учтено, что при токе пучка $I_b \approx 6$ кА и релятивистском факторе частиц $\gamma \approx 2$ учет пространственного заряда [5] приводит к необходимости увеличения оптимальной длины генератора примерно на 20% по сравнению со случаем исчезающего малого пространственного заряда. Изменение сопротивления связи z пучка с синхронной волной в нерегулярном карсинотроне задавалось путем изменения амплитуды гофрировки электродинамической системы и подбиралось экспериментально при сохранении общей длины системы и отношения $z_{\max}/z_{\min} \approx 6$ [3].

Поскольку длительность импульса тока была достаточно мала, особого внимания заслуживал вопрос о времени переходного процесса в карсинотроне. Для его оценки использовались результаты теории [6, 7]. Так как рабочий ток I_b превышал стартовое значение для генерации I_{st} уже на фронте импульса, а время пробега излучения по «кольцу» обратной связи $\tau \approx L \left(\frac{1}{v_{gr}} + \frac{1}{v_{||}} \right) \approx 1$ нс, то нарастание поля в приборе не должно было существенно отставать от роста тока. Действительно, для $\lambda \approx 3$ см, $I_b/I_{st} \approx 3$ согласно [6] для времени переходного процесса можно получить оценку $\tau_{пер} \approx 2-3$ нс, что подтверждается экспериментально (рис. 2, в).

Немаловажным для оптимизации всего устройства являлся также вопрос о формировании и транспортировке электронного пучка. В этом отношении довольно жесткое ограничение накладывается на величину внешнего магнитного поля H . Только при $H \approx 25$ кЭ обеспечивается, во-первых, достаточное удаление собственной циклотронной частоты электронов от полосы циклотронного поглощения встречной волны в карсинотроне [8], во-вторых, значительное снижение разброса поперечных скоростей электронов, наличие которых, в частности, может быть связано с эффектом экранировки поверхности катода и повышением плотности тока вблизи эмиссионных центров [9].

4. В первой серии экспериментов магнитное поле $H \approx 30$ кЭ создавалось импульсным соленоидом, позволявшим непродолжительное время работать с частотой повторения до 10 Гц. В этих условиях были получены импульсы СВЧ излучения длительностью на полувысоте $1,5-2$ нс и пиковой мощностью, измеренной калиброванным детектором на «горячих носителях», $P \approx 1$ ГВт, что соответствовало КПД прибора $\eta \approx 30\%$ и превышало уровень мощности, достигнутый в предыдущих экспе-

риментах более, чем втрое. При этом фактически весь энергетический потенциал ускорителя был освоен.

Для обеспечения длительной работы генератора в импульсно-периодическом режиме был использован сверхпроводящий соленоид, стационарное магнитное поле которого могло достигать 50 кЭ. С этой же целью при работе ускорителя с частотой повторения импульсов до 100 Гц зарядное напряжение ФЛ было снижено на 25—30%. Максимальная импульсная мощность СВЧ излучения в этом случае составила величину $P \approx 400$ МВт, а средняя мощность, измеренная калориметром, ≈ 60 Вт.

Таким образом, в проведенных исследованиях показана возможность создания мощного релятивистского карсинотрона с наносекундной длительностью импульсов, способного работать с электронным кпд 30% и уровнем мощности ≈ 400 МВт при частоте следования импульсов до 100 Гц.

ЛИТЕРАТУРА

1. Белоусов В. И., Бункин Б. В., Гапонов-Грехов А. В. и др. — Письма в ЖТФ, 1978, 4, вып. 23, с 1443
2. Ковалев Н. Ф., Петрухина В. И. — Электронная техника. Сер. Электроника СВЧ, 1977, № 7, с. 102.
3. Ельчанинов А. С., Загулов Ф. Я., Ковалев Н. Ф. и др. — Письма в ЖТФ, 1980, 6, № 7, с. 1443.
4. Ельчанинов А. С., Загулов Ф. Я., Коровин С. Д. и др. В кн.: Сильноточные импульсные электронные пучки в технологии. — Новосибирск: Наука, 1983, с. 5.
5. Ковалев Н. Ф. Диссертация. Горький, 1983
6. Гинзбург Н. С., Кузнецов С. П., Федосеева Т. Н. — Изв. вузов. — Радиофизика, 1978, 21, № 7, с. 1037
7. Гинзбург Н. С., Кузнецов С. П. В кн.: Релятивистская высокочастотная электроника. — Горький: ИПФ АН СССР, 1981, с. 101.
8. Братман В. Л., Гинзбург Н. С., Нусинович Г. С. и др. В кн.: Релятивистская высокочастотная электроника. — Горький: ИПФ АН СССР, 1979, с. 15
9. Беломятцев С. Я., Коровин С. Д., Месяц Г. А. — Письма в ЖТФ, 1980, 6, вып. 188, с. 1089.

Институт сильноточной электроники
СО АН СССР,
Институт прикладной физики
АН СССР

Поступила в редакцию
30 июля 1985 г.