

УДК 621.385.633

ОБ ИСПОЛЬЗОВАНИИ ЦИКЛОТРОННЫХ ВОЛН ДЛЯ ВЫВОДА ИЗЛУЧЕНИЯ ИЗ МОЩНЫХ РЕЛЯТИВИСТСКИХ ЛАМП ОБРАТНОЙ ВОЛНЫ

М. Б. Гойхман¹, А. В. Громов¹, В. В. Кладухин², Н. Ф. Ковалёв^{1*}, Н. Г. Колганов¹,
А. В. Палицин¹

¹ Институт прикладной физики РАН, г. Нижний Новгород;

² Институт электрофизики УрО РАН, г. Екатеринбург, Россия

Обсуждается схема мощной релятивистской лампы обратной волны, работающей на сильноточном взрывоэмиссионном электронном пучке. Вывод излучения из лампы основан на переотражении рабочей волны в быструю циклотронную волну, переносящую энергию высокочастотного поля в направлении коллектора. На коллекторе происходит обратное адиабатическое преобразование в выходную электромагнитную волну. Предлагаемая схема позволит повысить электропрочность, а также увеличить поперечные размеры рабочего пространства лампы обратной волны. Показано, что в предложенной схеме можно в несколько раз снизить фокусирующее магнитное поле без уменьшения мощности выходного излучения.

В релятивистских лампах обратной волны, использующих сильноточные взрывоэмиссионные пучки с небольшой длительностью [1, 2], энергию высокочастотного поля принято выводить согласно схеме, приведённой на рис. 1. Электромагнитная волна 1, излучённая электронами 2, отражается в области a специальным рефлектором, проходит (3) почти беспрепятственно по рабочему пространству b в обратном направлении и выводится (4) через плавно расширяющийся волновод, совмещённый с коллектором 5. В качестве рефлекторов обычно используются отрезки закритических волноводов [1] или небольшие полости в боковых стенках, работающие в режимах резонансных отражателей [2]. Конструкции генератора с обоими типами рефлекторов достаточно широкополосны, универсальны и хорошо совмещаются с сильноточными релятивистскими электронными пучками. Однако из-за ограничений по электропрочности схемы с отражениями в электромагнитную волну (рис. 1) применяются преимущественно в лампах обратной волны сантиметрового и дециметрового диапазонов длин волн с выходной мощностью не более $1\div 2$ ГВт и длительностью импульсов в несколько десятков наносекунд.

В настоящей работе рассмотрена несколько другая схема построения релятивистских ламп обратной волны на сильноточных замагниченных электронных пучках (рис. 2) с большей (в несколько раз) электропрочностью и способностью работать при значительно больших поперечных размерах рабочего пространства b . В предлагаемой схеме (рис. 2) излучённая электронами 2 волна 1 из рабочего пространства b переходит в область a с повышенным фокусирующим магнитным полем H , где полностью переотражается в быструю циклотронную волну 3, переносящую энергию высокочастотного поля в направлении z , т. е. к коллектору 5. В области коллектора с быстрая циклотронная волна попадает в плавно спадающее магнитное поле H и адиабатически полностью преобразуется (3) в выходную электромагнитную волну 4. Как видно, в новой схеме генератора (рис. 2) предполагается использовать неоднородное направляющее магнитное поле H (рис. 3а) и мягкую фокусировку электронного пучка (рис. 3б). Под мягкой фокусировкой здесь понимается режим работы лампы обратной волны со слабыми полями H_0 в рабочем пространстве b , точнее с магнитными полями, меньшими нижней границы зоны циклотронного поглощения с шириной ΔH_0 [3]; см. рис. 3б.

* kovalev@appl.sci-nnov.ru

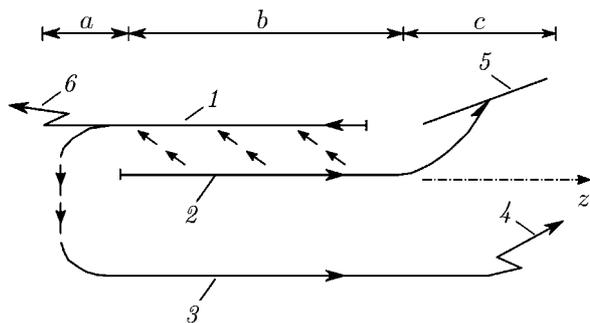


Рис. 1. Кинематическая схема мощной релятивистской лампы обратной волны: 1 — рабочая волна обратного типа, 2 — продольные волны электронного пучка, 3 — встречная (по отношению к рабочей волне 1) электромагнитная волна, 4 — выходящая электромагнитная волна, 5 — плавно расширяющийся выходной волновод, совмещённый с коллектором и поглотителем электронных волн, б — прошедшая в сторону электронной пушки часть энергии высокочастотного поля; а — область расположения рефлекторов; б — рабочее пространство лампы обратной волны; с — область расположения коллектора и выходного волновода. Короткими прямыми стрелками показаны направления преобразования волн

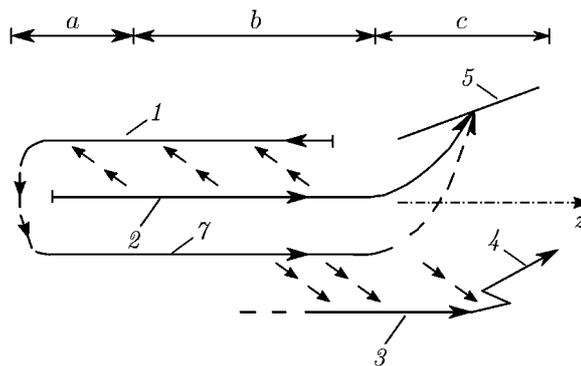


Рис. 2. Кинематическая схема лампы обратной волны с циклотронной волной: 1 — рабочая волна обратного типа, 2 — продольные электронные волны, 3 — встречная электромагнитная волна, 4 — выходящая волна, 5 — плавно расширяющийся выходной волновод, совмещённый с коллектором и поглотителем электронных волн, 7 — быстрая циклотронная волна; а — область расположения рефлекторов, б — рабочее пространство; с — область расположения коллектора, совмещённого с выходным волноводом. Короткими прямыми стрелками показаны направления преобразования волн

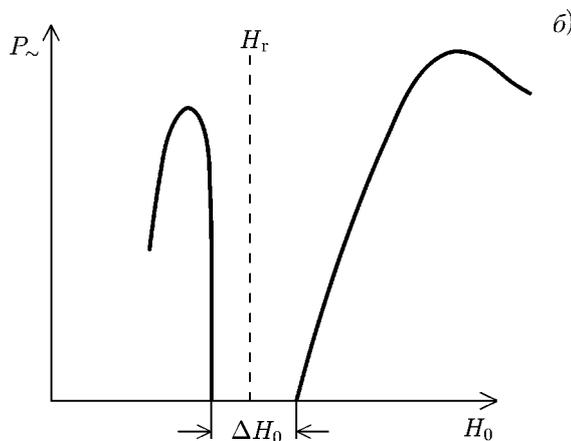
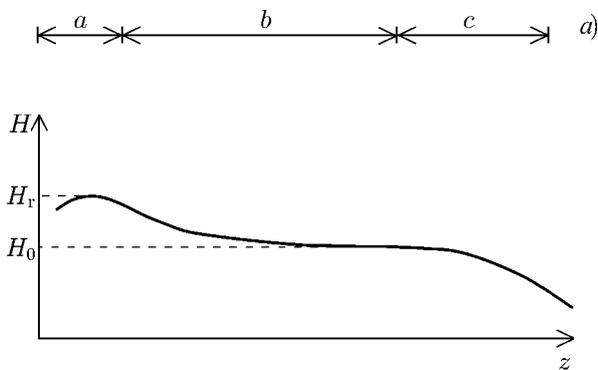


Рис. 3. Распределение фокусирующего магнитного поля H в лампе обратной волны с циклотронной волной (а) и зависимость мощности рабочей волны P_{\sim} от магнитного поля H_0 в области б при фиксированном диаметре электронного пучка (б); H_r — максимальное магнитное поле в области а; ΔH_0 — зона циклотронного поглощения в рабочем пространстве б

Основные свойства и специфику работы каждой из секций а, б и с удобно пояснить также на дисперсионных характеристиках, схематически показанных на рис. 4. В области а с увеличенным магнитным полем $H \approx H_r > H_0$ две взаимно встречные рабочая 1 и быстрая циклотронная 7 волны образуют широкую полосу зашпиравания Δk_r по волновому числу $k = \omega/c$ (ω — циклическая частота), в которой рабочая волна 1 переотражается в быструю циклотронную волну 7 электронного пучка, удерживаемого продольным магнитным полем $H(z)$; см. рис. 4а. После прохождения

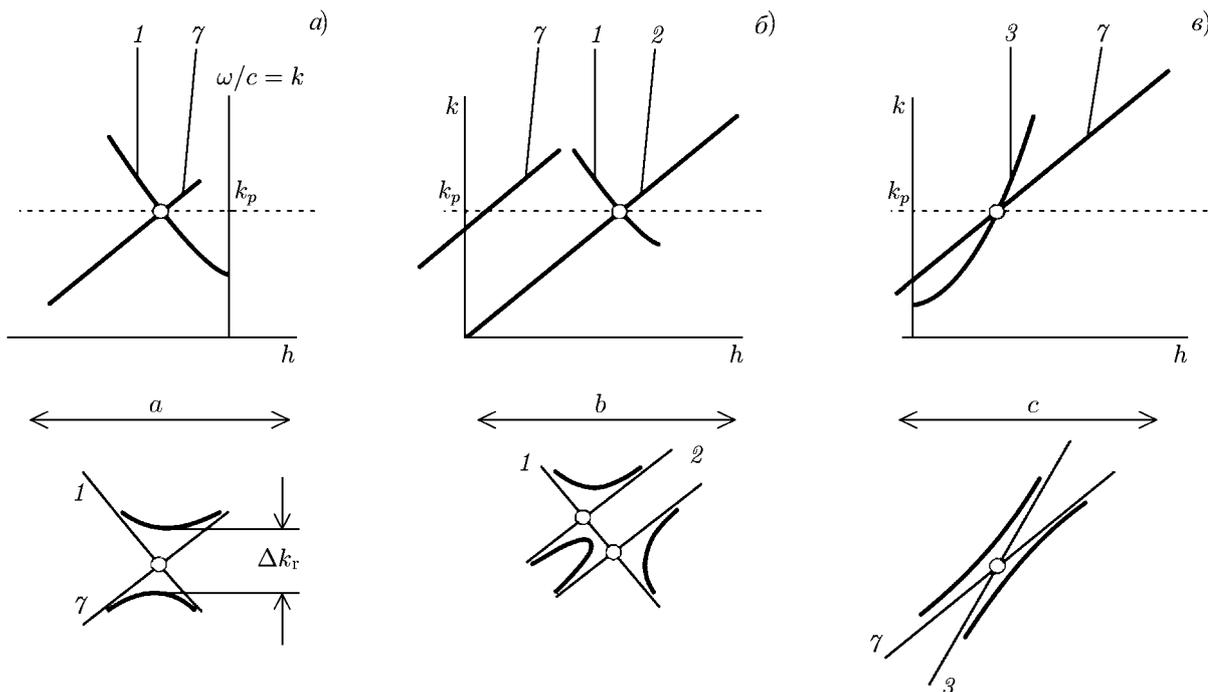


Рис. 4. Дисперсионные характеристики волн: *a* — в области рефлектора, *б* — в рабочем пространстве, *в* — в области коллектора, совмещённого с областью дифракционного вывода энергии высокочастотного поля; 1 — рабочая волна, 2 — электронные волны, 3 — встречная электромагнитная волна, γ — быстрая циклотронная волна, k и h — полное и продольное волновые числа распространяющихся волн, ω — циклическая частота. На нижних рисунках представлены в увеличенном масштабе расщепления дисперсионных кривых, показанных на верхних рисунках

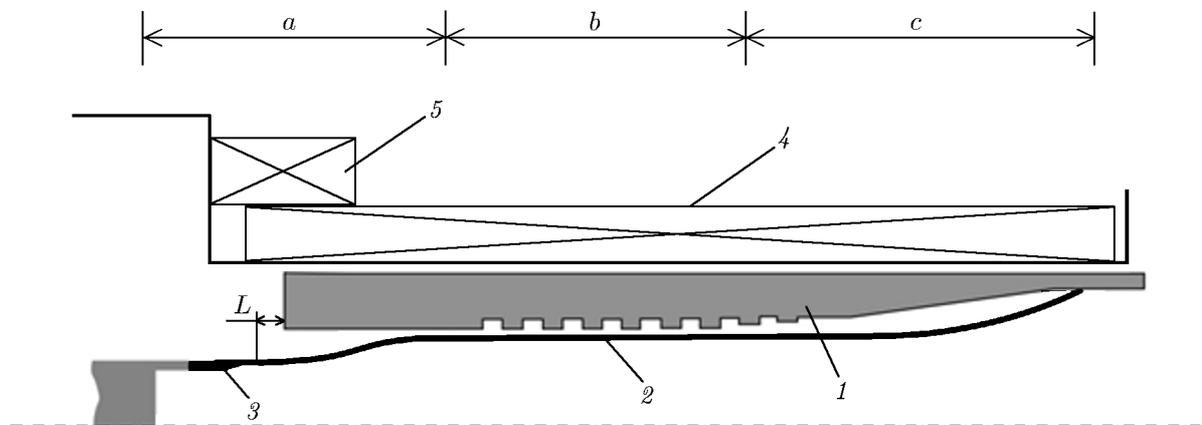


Рис. 5. Конструктивная схема экспериментальной лампы обратной волны: 1 — отрезок гофрированного волновода, 2 — электронный пучок, 3 — кромочный катод, 4 и 5 — основной и дополнительный соленоиды соответственно, L — ширина регулируемого зазора

рабочего пространства *b* в области коллектора *с* быстрая циклотронная волна γ уже в слабом магнитном поле $H < H_0$ и с существенно меньшим коэффициентом взаимной связи адиабатически преобразуется в выходную электромагнитную волну (рис. 4в). Оба преобразования, в областях *a* и *с*, широкополосны, универсальны и для своего осуществления не нуждаются в каких-либо тонких настройках и дополнительных подгонках.

В рабочей области генератора b , содержащей гофрированную систему, созданы условия для вынужденного черенковского излучения обратных электромагнитных волн 1 поступательно движущимися электронами пучка (см. рис. 4б). В этом же объёме b , но в направлении к коллектору быстрой циклотронной волной 7 переносится энергия высокочастотного поля. На боковых стенках электрическое поле этой волны 7 невелико, чем и объясняются высокие электропрочностные характеристики, и что является несомненным достоинством предлагаемой схемы (рис. 2).

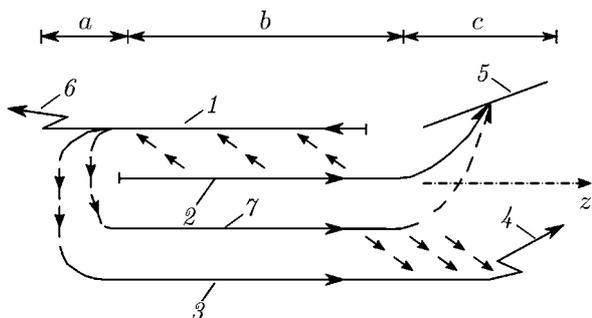


Рис. 6. Кинематическая схема лампы обратной волны с циклотронной волной: 1 — рабочая волна обратного типа, 2 — электронные волны, 3 — встречная электромагнитная волна, 4 — выходящая волна, 5 — плавно расширяющийся выходной волновод, совмещённый с коллектором и поглотителем электронных волн, 6 — прошедшая в сторону электронной пушки часть энергии высокочастотного поля, 7 — быстрая циклотронная волна; a — область расположения рефлекторов, b — рабочее пространство, c — область расположения коллектора, совмещённого с выходным волноводом. Короткими прямыми стрелками показаны направления преобразования волн

фазировка на входе преобразователя была чувствительна к частоте ω генерации лампы обратной волны и, соответственно, к величине питающего её напряжения U . По существу, был сделан простейший интерферометр, который позволяет получать легко наблюдаемые интерференционные картины, т. е. чередование максимумов и минимумов на огибающих высокочастотных импульсов при соответствующем изменении напряжения U в течение одного импульса.

В эксперименте лампа обратной волны работала в следующем режиме: длина волны излучения $\lambda = 3$ см, максимальное ускоряющее напряжение $U \approx 600$ кВ, напряжение U спадало к концу импульса примерно до 450 кВ; максимальный ток тонкостенного трубчатого электронного пучка порядка 6 кА, длительность импульса тока электронного пучка примерно 20 нс. В процессе экспериментов можно было изменять анодно-катодный зазор (ширина L на рис. 5), положение гофрированного участка и, соответственно, расстояние от него до электронной пушки, величину и конфигурацию магнитного поля (путём изменения токов в двух независимо запитываемых секциях соленоида, рис. 5) и диаметр эмитирующей кромки катода.

На рис. 7 приведены два набора осциллограмм: скошенные, т. е. спадающие, импульсы напряжения U и огибающие импульсов выходного излучения при соизмеримых амплитудах встречной электромагнитной и быстрой циклотронной волн, падающих на адиабатический преобразователь. При спаде напряжения U на $20 \div 30\%$ наблюдались три максимума на рис. 7а и два — на рис. 7б в мощности выходного излучения. Положение максимумов было чувствительно к изменениям

Работоспособность нового генератора была проверена экспериментально на сильноточном ускорителе и макете релятивистской лампы обратной волны без резонансного рефлектора-модулятора, описанных в работе [4]. Эскиз конструкции высокочастотного генератора приведён на рис. 5, а его кинематическая схема — на рис. 6. В первых предварительных экспериментах с целью большей наглядности использовалась несколько отличающаяся от рис. 2 кинематическая схема рис. 6 с укороченным адиабатическим преобразователем и с переотражением рабочей волны 1 частично в быструю циклотронную волну 7 и частично во встречную электромагнитную волну 3 . В результате на вход адиабатического преобразователя подавались две волны 3 и 7 с сравнимыми амплитудами, при взаимной фазировке которых мощность выходного излучения 4 могла изменяться в несколько раз.

В исследованном макете высокочастотного генератора (рис. 5) парциальные волны 3 и 7 на рис. 6 имели существенно разный набег фаз или разные электрические длины, и потому их фа-

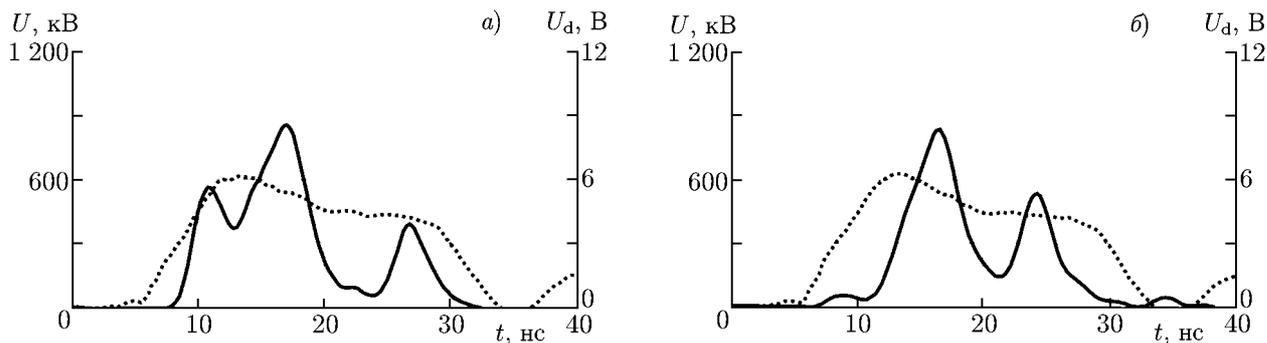


Рис. 7. (а) — осциллограммы импульсов ускоряющего напряжения U (пунктир) и огибающей U_d с детектора выходного излучения (сплошная линия) при сравнимых амплитудах встречной электромагнитной и быстрой циклотронной волн. (б) — другая реализация режима, показанного на панели а

регулируемых параметров, и, что важно, общая длительность импульса выходного излучения на рис. 7а была порядка 20 нс. Путём подбора регулируемых параметров в эксперименте на выходе генератора удалось получить импульсы излучения без интерференционных пиков и с длительностью, близкой к 16 нс (см. рис. 8). Это позволило установить более корректную синхронизацию импульсов напряжения и сверхвысокочастотных огибающих, которая не изменялась в течение всех экспериментов. Не изменялись в течение всех проведённых экспериментов и калибровки средств диагностики. На рис. 8, в отличие от рис. 7, представлены два комплекта наиболее различающихся осциллограмм из большой серии, полученной при одних и тех же регулируемых параметрах. Эти осциллограммы дают возможность оценить стабильность режима генерации исследуемой релятивистской лампы обратной волны. Из рис. 8 также видна высокая стабильность фронта импульса огибающей выходного излучения и предельно короткие времена включения генерации даже при не очень крутых фронтах импульсов напряжения U .

Мощность выходного излучения, соответствующая рис. 8, была почти в два раза меньше, чем в прототипе [4]. Это можно было бы объяснить неполным переизлучением в адиабатическом преобразователе и неполным отражением рабочей волны в области а, что условно отражено на рис. 6 в виде утекающей в область электронной пушки волны б. Исследование также показало, что длина использованного адиабатического преобразователя не достаточна, и в последующих экспериментах предполагается увеличить её в несколько раз.

Проведённые демонстрационные эксперименты убедительно показали эффективность переотражения рабочей волны в быструю циклотронную волну и возможность переноса энергии высокочастотного поля по рабочему пространству без заметного снижения электропрочностных характеристик. На основе предложенной схемы возможна также разработка новых средств измерения параметров рабочей волны и влияния быстрых циклотронных волн на выходное излучение. Воз-

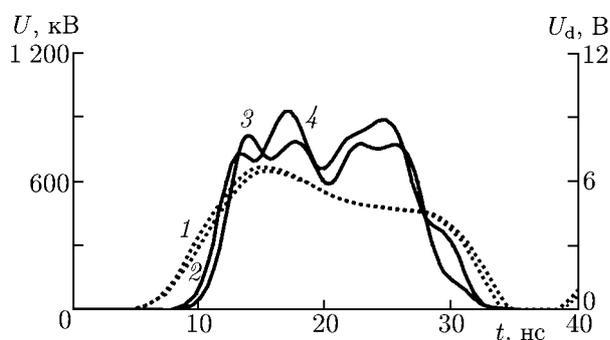


Рис. 8. Осциллограммы импульсов ускоряющего напряжения U (пунктирные линии 1 и 2 — различные реализации) и огибающей U_d с детектора выходного излучения (сплошные линии 3 и 4 — различные реализации) при многократно меньшей мощности встречной электромагнитной волны по сравнению с циклотронной волной и при увеличенном коэффициенте отражения в быструю циклотронную волну

можно полученные результаты помогут разобраться с изрезанностью и укорочением импульсов выходного излучения, наблюдаемыми во многих экспериментах.

Рассмотренный здесь способ использования в мощных релятивистских лампах обратной волны быстрых циклотронных волн далеко не единственный. В качестве примера можно упомянуть образование канала обратной связи в генераторе с компрессией сильно замагниченного взрывоэмиссионного электронного пучка. Возможная схема действия канала следующая. При жёсткой фокусировке, т. е. при магнитном поле H_0 в области b , большем верхней границы зоны циклотронного поглощения (рис. 3б), излучённая электронами рабочая волна частично переотражается в прикатодной области a слабых магнитных полей в быструю циклотронную волну, которая в приколлекторной области слабых магнитных полей c переотражается в рабочую волну. Переотражённая электромагнитная волна беспрепятственно подаётся на вход лампы обратной волны, замыкая цепь обратной связи. Этот дополнительный контур обратной связи, очевидно, может существенно изменить режим генерации и, соответственно, параметры выходного излучения. Не исключено также, что непреднамеренным образованием канала обратной связи можно объяснить некоторые из явлений, часто наблюдаемых в экспериментальных исследованиях мощных ламп обратной волны.

Наконец необходимо отметить, что использование предложенной, а не обычной схемы лампы обратной волны [1, 2], позволяет в несколько раз снизить фокусирующее магнитное поле без снижения мощности выходного излучения и заметно увеличить энергетический коэффициент полезного действия за счёт сокращения времени включения генерации, что является очень важным для короткоимпульсных генераторов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ковалёв Н. Ф., Петелин М. И., Райзер М. Д. и др. // Релятивистская высокочастотная электроника. Горький: ИПФ АН СССР, 1979. С. 76.
2. Коровин С. Д., Ростов В. В., Тотьменинов Е. М. // Письма в Журн. техн. физ. 2005. Т. 31, № 10. С. 17.
3. Абубакиров Э. Б., Ковалёв Н. Ф. // Релятивистская высокочастотная электроника. Нижний Новгород: ИПФ РАН, 1992. С. 7.
4. Гойхман М. Б., Громов А. В., Кладухин В. В. и др. // Письма в Журн. техн. физ. 2011. Т. 37, № 7. С. 87.

Поступила в редакцию 3 октября 2013 г.; принята в печать 11 февраля 2014 г.

ON USING CYCLOTRON WAVES FOR OUTPUT OF RADIATION FROM HIGH-POWER RELATIVISTIC BACKWARD-WAVE OSCILLATORS

M. B. Goykhman, A. V. Gromov, V. V. Kladukhin, N. F. Kovalev, N. G. Kolganov, and A. V. Palitsin

We discuss the scheme of a high-power relativistic backward-wave oscillator operating with a high-current explosion-emitted electron beam. The radiation output from the tube is based on rereflection of the operating wave to a fast cyclotron wave which transmits the energy of the high-frequency field towards the collector. At the collector, backward transformation into the output electromagnetic wave takes place. The proposed scheme allows one to increase electric reliability, as well as the transverse size of the working space of the backward-wave oscillator. It is shown that within the proposed scheme, one can reduce the focusing magnetic field without decreasing the power of the output radiation.