DOI: https://doi.org/10.30898/1684-1719.2025.11.11

УДК: 537.533.7+621.384.6.01

17-я Международная конференция

«Газоразрядная плазма и ее применения»

Екатеринбург, Россия, 8-12 сентября 2025

ВАРИАЦИЯ ПЕРЕХОДНОГО ПРОЦЕССА РЕЛЯТИВИСТСКОЙ ЛОВ Ka-ДИАПАЗОНА В НЕСТАЦИОНАРНОМ РЕЖИМЕ ГЕНЕРАЦИИ

М.И. Яландин[1,2], В.В. Ростов[3]

[1]Институт электрофизики УрО РАН
620016, Екатеринбург, ул. Амундсена, 106

[2]Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН
119991, Москва, Ленинский пр., 53

[3]Институт сильноточной электроники СО РАН
634055, Томск, Академический пр., 2/3

Статья поступила в редакцию 2 октября 2025 г.

Аннотация. Приводится краткий обзор исследований и новые результаты по вариации длительности переходного процесса нестационарной релятивистской лампы обратной волны Ka-диапазона. Вариация осуществляется при изменении тока электронов, связи пучка с синхронной гармоникой возбуждаемой волны TM_{01}, или интенсивности затравочного сигнала, определяемой крутизной его фронта. В первых дух случаях не только сдвигается лидирующий пик излучения, но и существенно меняется его мощность, а во втором варианте также смещается несущая частота. Отмеченные подходы демонстрировались экспериментально или в моделировании методом крупных частиц. Численный эксперимент показал, что при неизменной крутизне фронта тока длительностью переходного процесса можно управлять вариацией поперечных скоростей электронов

замагниченного пучка, при которой меняется амплитуда и время возникновения затравочного сигнала, но СВЧ-мощность остаётся постоянной.

Ключевые слова: коаксиальный диод, сильноточный пучок, лампа обратной воны, магнитное поле, поперечные скорости, переходной процесс.

Финансирование: Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда, грант № 24-19-00407, https://rscf.ru/project/24-19-00407/

Автор для переписки: Яландин Михаил Иванович, yalandin@iep.uran.ru

Введение

С начала 1970-х коаксиальные диоды с магнитной изоляцией (КДМИ) [1] и взрывоэмиссионными трубчатыми катодами [2] традиционно используются в качестве сильноточных электронных инжекторов [3] в релятивистских лампах обратной волны (ЛОВ) [4]. Эти СВЧ приборы диапазонов длин волн от единиц миллиметров до дециметра работают в квазистационарном или нестационарном режиме [5] и формируют, соответственно, мультимегаваттные и гигаваттные импульсы излучения с длительностью в единицы-десятки наносекунд [6] или ультракороткие пики излучения [7,8].

Так как различные образцы ЛОВ допускают пакетный или длительный режим работы с частотой повторения, они представляют практический интерес для короткоимпульсной локации [9], а также в задачах по анализу устойчивости электронной аппаратуры к электромагнитным воздействиям и для изучения реакции биологических объектов [10]. Вместе с тем, последние два десятилетия характеризуются «экспансией» релятивистских ЛОВ в область различных радиофизических экспериментов. Это исследования по компрессии СВЧ импульсов [11,12], их комптоновскому рассеянию встречным электронным потоком [13] и применение для накачки резонатора, в котором обеспечивается ускорение электронных сгустков с рекордным градиентом [14].

Отдельным результативным направлением является когерентное суммирование мощности сфазированных импульсов нескольких ЛОВ-генераторов при отсутствии электродинамической связи между каналами [15,16], а также

возбуждение генерации с фазой, навязанной внешним радиосигналом [17]. В этих экспериментах с нестационарными ЛОВ наряду с обеспечением стабильной по фазе генерации коротких пиков излучения критично совмещение их огибающих по времени. В отмеченных экспериментах это достигалось настройкой сдвига коротких фронтов ускоряющих импульсов, подаваемых на катоды двух или четырёх автономных ЛОВ, при их формировании в гиромагнитных нелинейных линиях с регулируемым насыщением ферритового заполнения. Вместе с тем, сдвиг импульсов генерации возможен альтернативным методом – за счёт изменения времени переходного процесса автогенераторов [5].

В настоящей работе приводятся результаты численного моделирования методом крупных частиц (код КАРАТ [18]) перестройки задержки генерации лидирующего пика излучения нестационарной ЛОВ Ka-диапазона при трансформации параметров электромагнитного возмущения, возникающего на фронте электронного пучка. Как будет показано ниже, такая перестройка возможна без существенного изменения мощности генерации и объясняется трансформацией разброса поперечных скоростей замагниченного пучка.

1. Конфигурация нестационарной релятивистской ЛОВ и некоторые эксперименты в Ka-диапазоне при слабом ведущем магнитном поле

Принципиальным моментом, определяющим современный уровень параметров нестационарных ЛОВ, является предложенная в 1990-х схема прибора с замедляющей структурой (ЗС) умеренной сверхразмерности (диаметр порядка 1.5λ, где λ – длина волны) и резонансным рефлектором на входе ЗС [19], не препятствующим проводке трубчатого пучка [20]. Такой вариант ЗС (рис. 1) обеспечивает высокоэффективную СВЧ генерацию в Ka-диапазоне при ведущем магнитном поле как после, так и до области ≈3 Тл [21], соответствующей условию циклотронно-резонансного поглощения [22] встречной волны TM_{01} электронным пучком с энергией ≈300 кэВ.

В пределе меньших магнитных полей (≈2 Тл) одной из мер для повышения эффективности генерации нестационарной ЛОВ является вариация траектории

пучка, диаметр которого возрастает по направлению к коллекторному концу ЗС (рис. 1а). Наравне с профилированием амплитуды гофрировки ЗС, этот подход позволяет оптимизировать аксиальное распределение сопротивления связи пучка с синхронной волной, чтобы обеспечить передачу его энергии к излучению в распределённом режиме при прохождении вдоль всей ЗС, то есть, исключить раннее или, наоборот, позднее насыщение мощности СВЧ генерации. Кроме того, увеличенный зазор от пучка до гофрировки в области катодного конца ЗС предотвращает выброс пучка на стенку, где вблизи рефлектора амплитуды СВЧ полей наиболее велики.

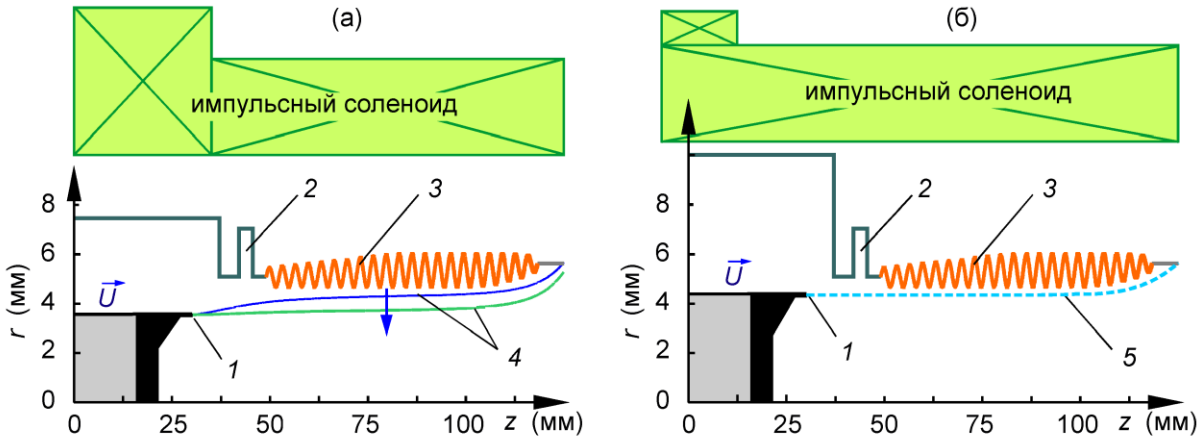

Рис. 1. Конфигурации нестационарных релятивистских ЛОВ Ка-диапазона с трубчатым взрывоэмиссионным катодом (*1*), резонансным рефлектором (*2*) и неоднородной ЗС (*3*), работающих в области магнитных полей до (а) и выше значения циклотронного резонанса (б). Другие обозначения: *4* – силовые линии соленоида при изменении декомпресиии магнитного потока; *5* – траектория пучка в режиме без декомпрессии.

В экспериментах [23] была реализована значительная вариация траектории (диаметра) пучка за счёт её изменения методом перестройки декомпрессии магнитного потока соленоида [24]. Как видно на рис. 2а, удаление трубчатого пучка от гофрировки ЗС (это нижняя силовая линия на рис. 1а) приводит к существенной задержке лидирующего пика излучения и сопровождается кратным падением его мощности. Моделирование методом крупных частиц [18] (см. рис. 6 в работе [23]) подтверждало представленное на рис. 2а изменение времени переходного процесса и пиковой мощности генерации. В эксперименте также было показано, что из-за роста потенциала пучка при его удалении

от стенки ЗС энергия электронов снижается, и это сопровождается изменением частоты генерации более чем на 600 МГц.

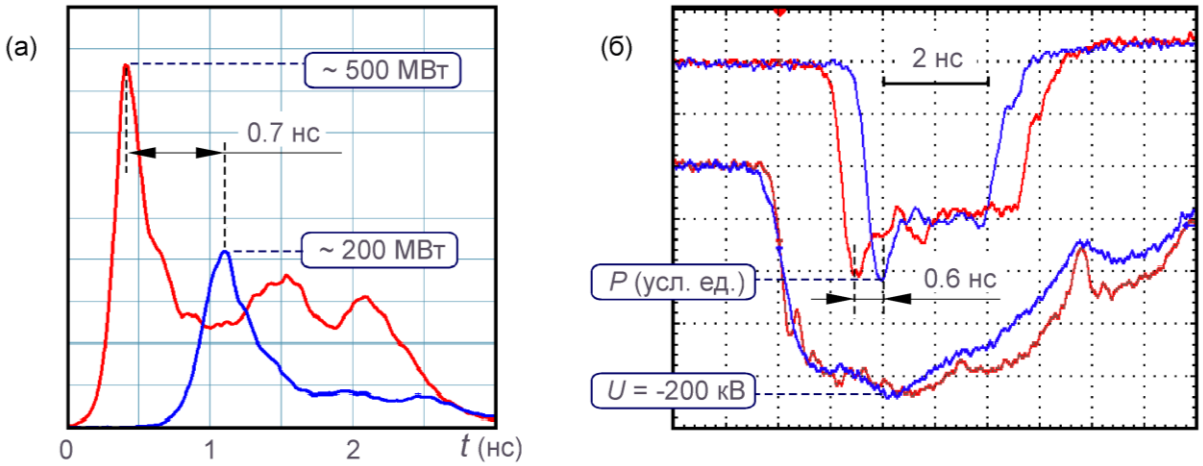

Рис. 2. (а) Смещение лидирующего пика нестационарной генерации ЛОВ и падение его амплитуды при удалении траектории трубчатого пучка от гофрировки ЗС (стрелка на рис. 1а). (б) Смещение сигнала СВЧ детектора (*P*) без изменения мощности излучения в том же режиме генерации ЛОВ, но при изменении обострения напряжения питания *U*. Магнитное поле ниже значения циклотронного резонанса.

Осуществить сдвиг пика нестационарной генерации ЛОВ возможно с использованием выводов работы [5], где показано, что с обострением фронта пучка в установлении переходного процесса прибора над излучением шумовых флуктуаций электронной плотности (дробовым эффектом) будет доминировать излучение резкого фронта тока. В экспериментах [25] такой опережающий затравочный радиосигнал наблюдался в реальном времени, когда питающее катод напряжение (и ток пучка, соответственно) обострялось, как это показано на рис. 2б (красный луч). Подобная трансформация приводила к более раннему (на 0.6 нс) возникновению лидирующего пика генерации, который на этом рисунке представлен в виде сигнала напряжения с нелинейного СВЧ детектора и поэтому, в отличие от рис. 2а, имеет незначительное превышение по амплитуде в сравнении с затянутым «хвостовым» сигналом. Видно, что, не смотря на значительную задержку пика СВЧ, его амплитуда не изменилась.

2. Гигаваттная нестационарная ЛОВ с сильным магнитным полем

Для практических применений и в различных экспериментах обосновано стремление использовать импульсы СВЧ излучения максимальной пиковой мощности. Применительно к релятивистским ЛОВ Ка-диапазона это предполагает переход к схеме прибора, представленной на рис. 1б. Её особенность заключается в практически неизменном диаметре трубчатого пучка в области однородного участка удлинённой ЗС и использовании сильного ведущего магнитного поля. Например, в эксперименте [26], где пиковая мощность излучения достигла 1.2 ГВт, поле имело индукцию ≈6.5 Тл. Это позволяло формировать тонкий трубчатый пучок, проводить его близко к гофрировке и, при этом, предотвратить выброс электронов на стенку ЗС вблизи рефлектора, на кромке которого напряженность электрических компонент СВЧ поля достигала 2 МВ/см. Эти особенности и оптимизация профиля гофрировки ЗС позволили получить конверсию мощности пучка в излучение ≈1.5.

Изображенная на рис. 1б схема включает ЗС, идентичную применявшейся в приборе со слабым магнитным полем (рис. 1а) [16,17,23,25]. Вариант на рис. 1б показывает в расчётной модели (рис. 3а) усреднённую мощность в максимуме лидирующего пика излучения, близкую к 1 ГВт (красный пик на рис. 3б). В данном численном эксперименте, и представленных ниже, мы используем *r*-*z* версию кода КАРАТ [18] с самосогласованной моделью эмиссии пучка без порогового электрического поля. Ускоряющий импульс с амплитудой −220 кВ, подаваемый на катод по коаксиальной передающей линии с волновым сопротивлением 45 Ом, представлял перепад с фронтом в 200 пс. Это близко к типичным экспериментальным условиям. На катоде амплитуда напряжения возрастает до −330 кВ. Эмиссия пучка с током ≈2.4 кА осуществлялась с торца катода толщиной 0.2 мм из области одной ячейки расчётной сетки 0.1 × 0.1 мм. Это задавало минимально возможную толщину трубчатого пучка.

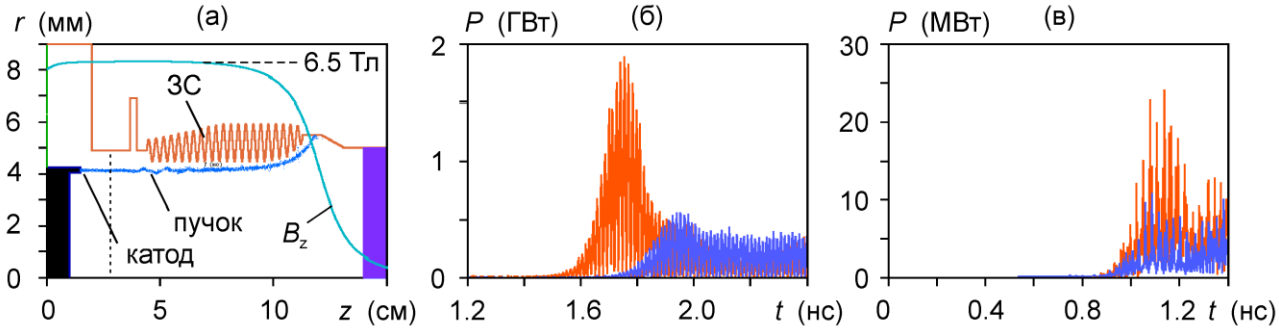

Рис. 3. (а) Геометрия численной модели ЛОВ с сильным магнитным полем и его распределение на оси. (б) Мгновенная мощность лидирующих СВЧ импульсов для амплитуд тока пучка 2.4 и 1.2 кА (красный и голубой сигнал, соответственно. (в) Опережающие (затравочные) сигналы для тех же токов.

Когда ток пучка был искусственно снижен в 2 раза полупрозрачной фольгой в анодном сужении (пунктир на рис. 3а), мощность лидирующего пика излучения упала примерно в 3.5 раза (синий пик на рис. 3б), что близко к квадрату отношения токов ($2^2 = 4$). Это подтверждает когерентность пика излучения, так как его интенсивность квадратично зависит от количества излучающих электронов. Также видно значительное запаздывание пика СВЧ импульса, что соответствует выводам работы [5]. Обратим внимание, что ещё до фронта этого пика наблюдается всплеск излучения (рис. 3в). Его мощность мегаваттного уровня примерно на 2 порядка меньше, чем у основного пика излучения. Из-за этого ранее в расчётах на данную деталь внимание не акцентировалось. Между тем, такой всплеск излучения имеет спектральный максимум на рабочей частоте ЛОВ и его можно интерпретировать как затравочный сигнал, связанный с фронтом тока пучка. Напомним, что в экспериментах [17] по навязке фазы генерации ЛОВ внешним радиоимпульсом относительно малой мощности требовалась его «удачная» синхронизация, обеспечивающая начало модуляции пучка раньше, чем это произойдёт в полях затравки от фронта тока. Когда использовался ускоряющий импульс (и ток) с плавным фронтом, и мощный «собственный» затравочный сигнал не возникал, для возбуждения генерации с фазой, коррелирующей с фазой внешней затравки, была достаточна мощность последней в десятки киловатт [27]. С обострением фронта мощность внешней затравки приходилось увеличивать.

3. Вариация переходного процесса нестационарной ЛОВ Ka-диапазона при фиксированной мощности генерации

На рис. 4 представлены результаты численного моделирования, показывающие, что параметры электромагнитной затравки от фронта тока пучка можно варьировать, не меняя его крутизну. Это осуществляется, если пучок провести через канал цилиндрической вставки в анодном сужении КДМИ (пунктирный квадрат на рис. 4а). При прочих равных условиях, когда вставка имеет скругление (рис. 5а), проходящие в канал электроны приобретают значительно меньшие поперечные скорости, чем при угле 90° на входе (рис. 5б). Это связано с пониженным искажением электрического поля в области плавного скачка диаметра анода и позволяет проводить пучок в сильном магнитном поле вблизи стенки канала во вставке без потери тока. Фазовые портреты пучков на рис. 5 представлены в момент 300 пс. Так как доставка напряжения на катод (в точку $z = 1.5$ см) происходит за 50 пс, то оставшиеся $(300-50) = 250$ пс включают как фронт длительностью 200 пс, так и выход тока пучка на полку. В случае с плавной кромкой на рис. 5а видно, что в канале сужения ($z > 2$ см) максимальные поперечные скорости электронов возросли не более, чем на 20 % по сравнению теми, которые достигаются на ускоряющем участке $z = 1.5 \div 2$ см. По этой причине вариант вставки со скруглённой кромкой был использован в модели на рис. 4.

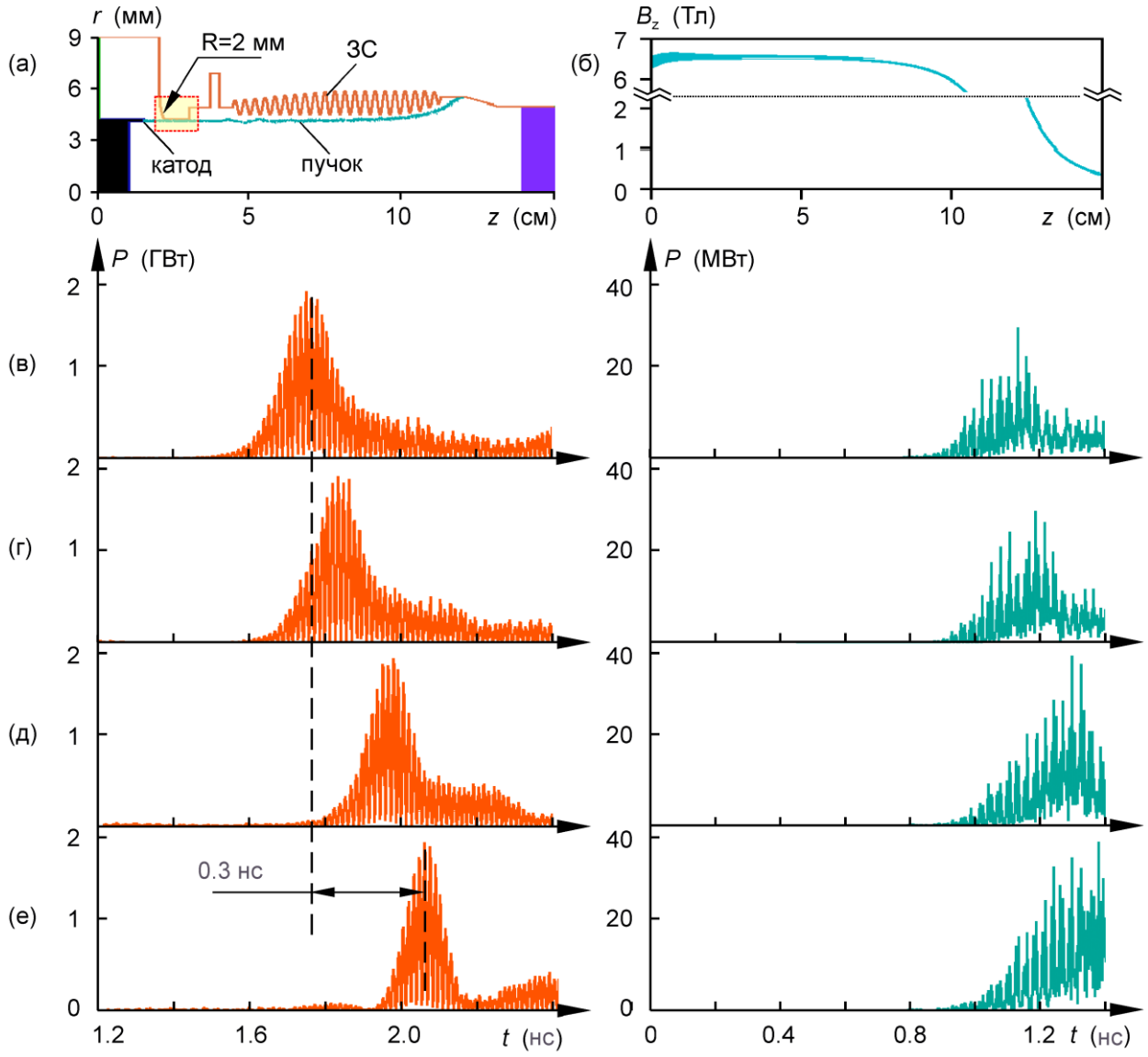

Рис. 4. (а) Численная модель с вставкой в анодном сужении и трансформация ведущего магнитного поля (б) при увеличении тока в вспомогательной обмотке соленоида (рис. 1б). (в-е) Смещение лидирующего пика генерации ЛОВ (левая колонка) а также затравочного сигнала (правая колонка) при увеличении декомпрессии магнитного потока соленоида без коллимации пучка.

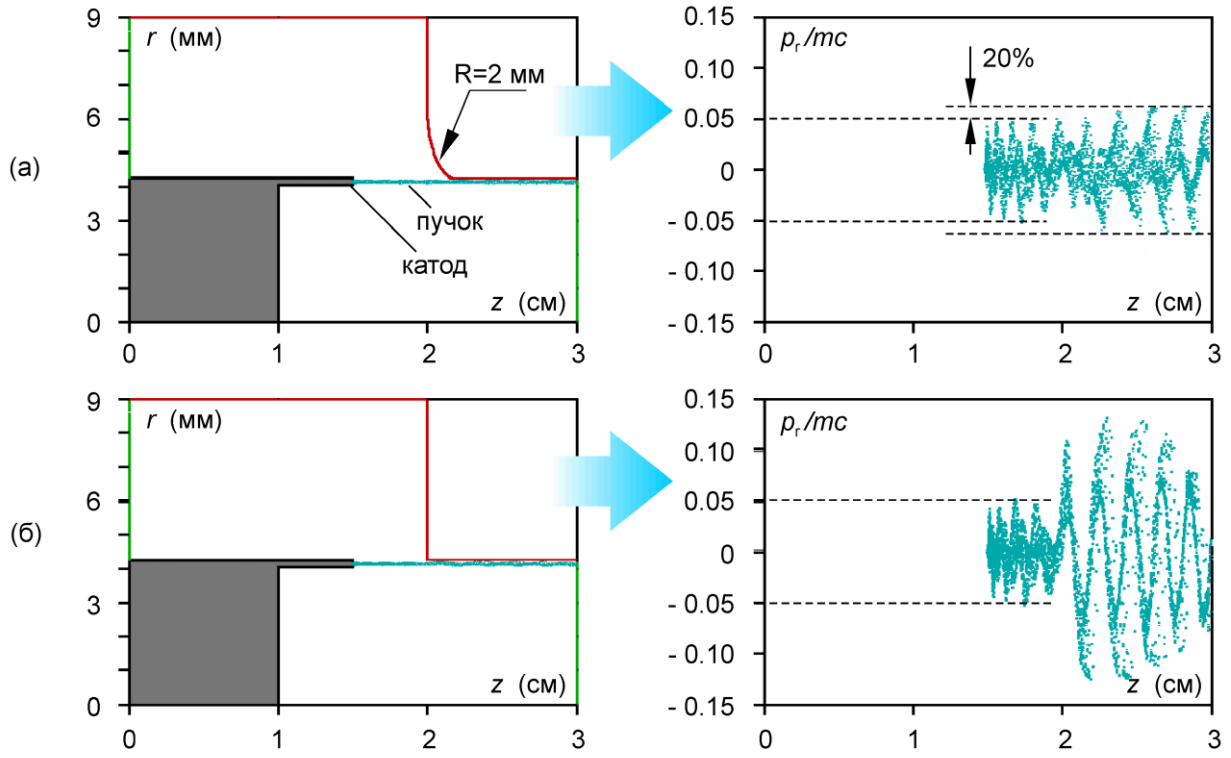

Рис. 5. Варианты геометрии анодного сужения КДМИ и фазовые портреты пучка в канале в момент t = 300 пс в координатах (p_r/mc, z).
Здесь p_r – поперечная компонента импульса электронов, m – его масса покоя, c – скорость света.

Не смотря на малый зазор от пучка до стенки канала внутри вставки (≈0.1 мм), возможны незначительные вариации траектории (диаметра) пучка в этой области за счёт изменения распределения магнитного поля. В расчётной модели это осуществляется увеличением тока во вспомогательной обмотке соленоида, показанной на рис. 1б. Изменение режима возбуждения ЛОВ (в)→(е) на рис. 4 оказалось возможным при вариации магнитного поля в области, показанной на рис. 4б заливкой. Более детально эта вариация поля в области ускоряющего промежутка и вставки представлена на рис. 6а и 6б. Индукция магнитного поля на дистанции от катода до окончания вставки (z = 1.5 ÷ 3 см) в первом случае нарастала от 6.50 до 6.52 Тл а во втором – спадала от 6.58 до 6.55 Тл. Во втором варианте характер изменения поля должен, казалось бы, приводить к спаду (хотя и очень незначительному) амплитуды поперечных скоростей электронов в соответствии с законом адиабатического инварианта [28]. Однако из сравнения фазовых портретов пучка на рис. 6в и 6г следует противоположный

вывод. Причина в том, что в режиме на рис. 6б и 6г пучок проходит ближе к стенке канала, в связи с чем усиливается радиальное электрическое поле, возникающее между электроном и его отражением противоположной полярности, наведённом в металле. В этом поле электрон увеличивает поперечную составляющую скорости.

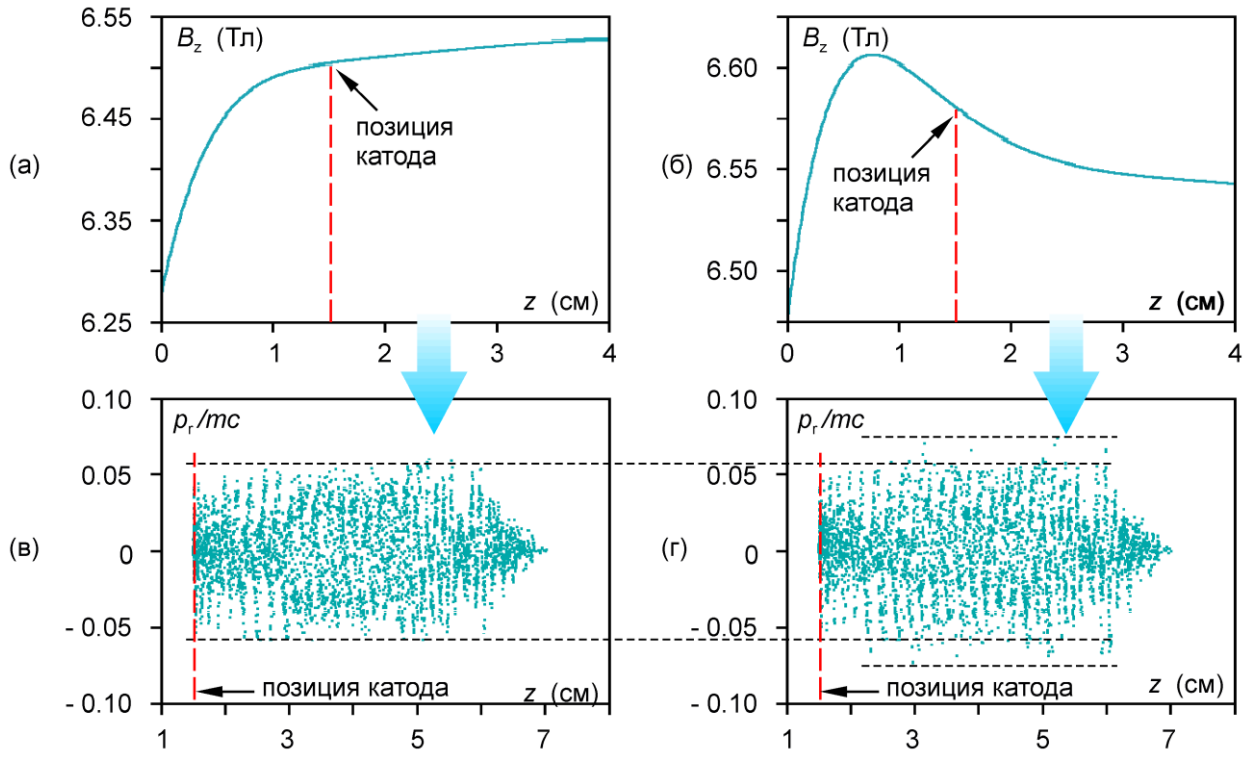

Рис. 6. (а,б) Распределения магнитного поля, включающие зону эмиссии катода и вставку для случаев (в) и (е) на рис. 4, соответственно, и фазовые портреты (p_r / mc, z) пучков (в,г) для этих вариантов, записанные в момент t = 400 пс.

Заключение

Представленные на рис. 6 расчёты показывают, что при переходе генерации от режима (в) к (е) на рис. 4 происходит увеличение поперечных скоростей электронов, попадающих в замедляющую систему ЛОВ. Как следует из рис. 6в и 6г разброс нормированного поперечного импульса частиц пучка δp_r / mc возрастает в диапазоне ±(0.06 ÷ 0.075). Характерная величина продольного импульса p_z / mc для пучка с кинетической энергией ≈330 кэВ составляет 1.3, и поэтому разброс δp_r / mc в верхнем пределе будет увеличивать дисперсию δp_z / mc.

То есть, изменение $\delta p_r / mc$ (рис. 6в → 6г) приводит к связанной трансформации спектра p_z / mc (и продольных энергий электронов), что и влияет на момент формирования затравочного сигнала (правая колонка на рис. 4в-4е). По-видимому, это является основной причиной смещения момента возникновения лидирующего пика нестационарной генерации, которое достигло 300 пс, то есть, примерно в 1.5 раза превышает длительность этого пика на полувысоте.

Полученное в расчётах изменение задержки пика излучения ЛОВ происходит без видимого изменения мощности. Можно предположить, что это связано с «избыточной» длиной замедляющей системы. Вероятно, насыщение амплитуды лидирующего пика происходит «при меньшей длине ЗС», если затравка возникает раньше. Продемонстрированный результат перестройки задержки переходного процесса нестационарной генерации ЛОВ с сохранением мощности может, безусловно, представлять интерес для задач высокоградиентного ускорения электронных сгустков в каскаде резонаторов, запитанных синхронизированными гигаваттными субнаносекундными коротковолновыми СВЧ импульсами.

Финансирование: Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда, грант № 24-19-00407, https://rscf.ru/project/24-19-00407/

Литература

1. Бугаев С.П., Ильин В.П., Кошелев В.И. и др. Формирование сильноточных релятивистских электронных пучков для мощных генераторов и усилителей СВЧ // В кн.: Релятивистская высокочастотная электроника. Горький ИПФ АН СССР. - 1979. - С. 5-75.
2. Mesyats G.A., Explosive Electron Emission (Yekaterinburg: URO-Press. - 1998).
3. Месяц Г.А. Импульсные ускорители для релятивистской СВЧ-электроники // В кн.: Релятивистская высокочастотная электроника. Горький ИПФ АН СССР. – 1984. - С. 193-216.

4. Ковалев Н.Ф., Петелин М.И., Райзер М.Д. и др. Генерация мощных импульсов электромагнитного излучения потоком релятивистских электронов // Письма в ЖЭТФ. – 1973. - Т. 18. - № 4. С. 232-235.
5. Гинзбург Н.С., Кузнецов С.П., Федосеева Т.Н. Теория переходных процессов в релятивистской ЛОВ. // Изв. Вузов. Радиофизика. – 1978. – Т. 21. - № 7. - С. 1037-1052.
6. Benford J., Swegle J. A., Schamiloglu E. High Power Microwaves, 3rd ed. (New York: CRC Press. - 2016).
7. Korovin S.D., Eltchaninov A.A., Rostov V.V., et al. Generation of Cherenkov superradiance pulses with a peak power exceding the power of the driving short electron beam // Phys. Rev. E. – 2006. - V. 74. – No. 1. – Art. no. 016501.
8. Rostov V.V., Romanchenko I.V., Pedos M.S., et al. Superradiant Ka-band Cherenkov oscillator with 2-GW peak power // Phys. Plasmas. – 2016. - V. 23. – No. 9. – Art. no. 093103.
9. Бункин Б. В., Гапонов-Грехов А. В., Ельчанинов А. С. И др. Радиолокатор на основе СВЧ-генератора с релятивистским электронным пучком // Письма в ЖТФ. – 1992. Т. 18. - № 9. - С. 61-64.
10. Бецкий О.В., Голант М.Б., Девятков Н.Д. Миллиметровые волны в биологии. (М.: Знание. – 1987).
11. Братман В.Л., Денисов Г.Г., Колганов Н.Г. и др. Микроволновый источник мультигигаваттной пиковой мощности на основе комбинации релятивистской лампы обратной волны и компрессора // ЖТФ. – 2011. – Т. 81. - № 2. - С. 113-117.
12. Яландин М.И., Реутова А.Г., Ульмаскулов М.Р. и др. Эффект нелинейной компрессии ультракоротких микроволновых импульсов в процессе усиления квазистационарными электронными потоками // Письма в ЖЭТФ. – 2010. - Т. 91. - № 11. - С. 620-625.

13. Реутова А.Г., Ульмаскулов М.Р., Шарыпов К.А. и др. Экспериментальное наблюдение эффекта сверхизлучения при вынужденном встречном рассеянии мощной микроволновой волны накачки сильноточным релятивистским электронным сгустком субнаносекундной длительности // Письма в ЖЭТФ. – 2005. - Т. 82. - № 5. - С. 295-299.
14. Ginzburg N.S., Fedotov A.E., Kuzikov S.V., et al. Demonstration of High-gradient Electron Acceleration Driven by Subnanosecond Pulses of Ka-band Superradiance // Phys. Rev. Acceler. Beams. – 2023. - V. 26. – No. 6. - Art. no. 060401.
15. Ельчанинов А.А., Климов А.И., Ковальчук О.Б. и др. Когерентное сложение мощности наносекундных релятивистских СВЧ-генераторов // ЖТФ. – 2011. - Т. 81. - № 1. - С. 125-130.
16. Ginzburg N.S., Cross A.W., Golovanov A.A., et al., Generation of Electromagnetic Fields of Extremely High Intensity by Coherent Summation of Cherenkov Superradiance Pulses // Phys. Rev. Lett. – 2015. - V. 115. – No. 11. – Art. no. 114802.
17. Mesyats G.A., Ginzburg N.S., Golovanov A.A., et al., Phase-Imposing Initiation of Cherenkov Superradiance Emission by an Ultra-Short Seed Microwave Pulse // Phys. Rev. Lett. - 2017. - V. 118. – No. 26. – Art. no. 264801.
18. Tarakanov V.P. Code KARAT in simulations of power microwave sources including Cherenkov plasma devices, vircators, orotron, E-field sensor, calorimeter etc. // EPJ Web Conf. – 2017. - V. 149. – Art. no. 04024.
19. Denisov G.G., Lukovnikov D.A., Samsonov S.V. Resonant reflectors for free electron masers // Int. J. Infrared and Millimeter Waves. - 1995. - V. 16. – No. 4. - P. 745-752.
20. Куркан И.К., Ростов В.В., Тотьменинов Е.М. О возможности снижения магнитного поля в релятивистской ЛОВ // Письма в ЖТФ. – 1998. - Т. 24. - № 10. - С. 43-47.

21. Коровин С.Д., Месяц Г.А., Ростов В.В. и др. Высокоэффективная генерация импульсов субнаносекундной длительности в релятивистской ЛОВ миллиметрового диапазона длин волн // Письма в ЖТФ. - 2002. - Т. 28. - № 2. - С. 81-89.
22. Абубакиров Э.Б., Белоусов В.И., Варганов В.Н. и др. Экспериментальная реализация метода циклотронно-резонансной селекции мод в релятивистских электронных высокочастотных генераторах черенковского типа // Письма в ЖТФ. – 1983. - Т. 9. - № 9. - С. 533-536.
23. Boltachev G.Sh., Rostov V.V., Sharypov K.A., et al., Control of the Operation Mode of a Relativistic Ka-Band Backward-Wave Oscillator // IEEE Trans. Plasma Sci. – 2015. - V. 43. - No. 8. - P. 2613 - 2620.
24. Abubakirov E.B., Fuchs M.I., Kolganov L.G. et. al. // Abstr. of III Int. Workshop «Strong Microwaves in plasmas». - N.Novgorod, Russia, 1996, p.S19.
25. Shunailov S.A., Mesyats G.A., Romanchenko I.V., et al., Electromagnetic noise of a nanosecond magnetized high-current electron beam // J. Appl. Phys. – 2019. – V. 126. – No. 16. – Art. no. 164504.
26. Коровин С.Д., Месяц Г.А., Ростов В.В. и др. Субнаносекундный источник импульсов излучения в диапазоне 38 ГГц с импульсной мощностью 1 ГВт // Письма в ЖТФ. -2004. - Т. 30. - № 3. - С. 68-74.
27. Sharypov K.A., Shunailov S.A., Ginzburg N.S., et al. Development of the Concept of High-Power Microwave Oscillators with Phase Locking by an External Signal // Radiophys. Quantum Electr. – 2019. - V. 62. - No. 7–8. - P. 447-454.
28. Арцимович Л.А., Лукьянов С.Ю. Движение заряженных частиц в электрических и магнитных полях (М.: Наука, 1978).

Для цитирования:

Яландин М.И., Ростов В.В. Вариация переходного процесса релятивистской ЛОВ Ka-диапазона в нестационарном режиме генерации. // Журнал радиоэлектроники. – 2025. – № 11. https://doi.org/10.30898/1684-1719.2025.11.11