УДК 621.37

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ПУЧКА ЭЛЕКТРОНОВ С СИЛЬНЫМ ВЫСОКОЧАСТОТНЫМ ПОЛЕМ В ВОЛНОВОДНОМ ПЕРЕКЛЮЧАТЕЛЕ МОЩНОГО СВЕРХВЫСОКОЧАСТОТНОГО КОМПРЕССОРА

 $M.\,A.\,\, Лобаев^{\,1\,*},\,\,O.\,A.\,\, Иванов^{\,1},\,\,A.\,\,Л.\,\, Вихарев^{\,1},\,\,A.\,\,M.\,\, Горбачёв^{\,1,2},\,\,B.\,A.\,\, Исаев^{\,1}$ Институт прикладной физики РАН;

Представлены результаты численного моделирования работы мощного активного компрессора сверхвысокочастотных импульсов излучения трёхсантиметрового диапазона длин волн с волноводным коммутатором, переключаемым электронным пучком. Обсуждается влияние нелинейного характера взаимодействия пучка электронов с высокочастотным полем в переключателе на выходные параметры компрессора и сравниваются результаты расчёта с данными эксперимента. Показано, что при высокой мощности входного излучения эффект выталкивания электронов из области неоднородного высокочастотного поля в коммутаторе может приводить к снижению коэффициента усиления компрессора и удлинению переднего фронта сжатого импульса.

ВВЕДЕНИЕ

Дальнейший прогресс в развитии физики высоких энергий связан с созданием линейных ускорителей заряженных частиц, обеспечивающих достижение ими энергии порядка 1 ТэВ. Одной из основных задач при создании таких коллайдеров является разработка источника сверхвысокочастотного (СВЧ) излучения с необходимыми мощностью и длительностью импульса для их ускоряющих секций. В настоящее время одним из наиболее эффективных методов получения мощных наносекундных СВЧ импульсов считается пассивная и активная компрессия импульсов [1-4]. При этом активные компрессоры позволяют достичь более высоких коэффициентов усиления по мощности при сохранении высокой эффективности компрессии и когерентности излучения. Метод активной компрессии основан на накоплении электромагнитной энергии в высокодобротном СВЧ резонаторе и последующем её быстром выводе путём увеличения связи резонатора с нагрузкой (модуляции добротности) с помощью специального быстродействующего коммутатора (переключателя). Данный метод привлекает возможностью получения высоких коэффициентов усиления по мощности (около $10 \div 40$) и компактностью накопительного резонатора. Основным элементом активного компрессора, определяющим мощность выходного импульса, является волноводный переключатель, обеспечивающий вывод энергии из накопительного резонатора. Мощность импульсов в существующих активных СВЧ компрессорах в значительной мере ограничена низкой электрической прочностью используемых в них коммутаторов, связанной с размещением в последних переключающих элементов (газоразрядных трубок, диэлектриков или полупроводников). В работах [5–7] был предложен и реализован новый тип резонансного волноводного коммутатора, переключаемого пучком электронов. Его действие основано на быстром изменении коэффициента трансформации моды ${\rm TE}_{0.2}$ в ${\rm TE}_{0.1}$ при инжекции пучка электронов в резонатор коммутатора. Использование электронного пучка позволило избежать размещения активных элементов в области сильных СВЧ полей и многократно увеличить коммутируемую

² Нижегородский госуниверситет им. Н. И. Лобачевского, г. Нижний Новгород, Россия

^{*} lobaev@appl.sci-nnov.ru

мощность по сравнению с другими типами переключателей. В работе [7] были достигнуты рекордные для активной компрессии в 3-сантиметровом диапазоне длин волн параметры сжатых импульсов: мощность 160÷190 МВт, длительность импульсов 16÷20 нс и коэффициент усиления по мощности 20÷25. В то же время эксперименты [6, 7] показали, что обеспечиваемый компрессором коэффициент усиления зависит от мощности входного СВЧ излучения и начинает уменьшаться при превышении последней некоторого порогового значения. Поэтому дальнейшее увеличение мощности сжатых импульсов требует более детального исследования процесса взаимодействия пучка электронов с СВЧ полями в переключателе. Действительно, возникающий при таком взаимодействии эффект выталкивания пучка из области неоднородного высокочастотного поля может заметно влиять на коэффициент усиления мощности и время переключения.

В данной статье приводится детальный анализ работы активного компрессора СВЧ импульсов, основанного на преобразовании моды $TE_{0,2}$ в $TE_{0,1}$ и использовании волноводного коммутатора, который переключается электронным пучком. Представлены результаты численного моделирования процесса взаимодействия пучка электронов с сильным неоднородным электромагнитным полем, возникающим в резонаторе переключателя при высокой мощности входного излучения. Обсуждается влияние нелинейного характера взаимодействия пучка с высокочастотным полем в переключателе на выходные параметры компрессора и приводится сравнение результатов расчёта с данными эксперимента.

1. СВЧ КОМПРЕССОР С ВОЛНОВОДНЫМ ПЕРЕКЛЮЧАТЕЛЕМ НА ЭЛЕКТРОННОМ ПУЧКЕ

Конструкция СВЧ компрессора с волноводным коммутатором, переключаемым электронным пучком, показана на рис. 1. Усиление мощности в компрессоре обеспечивается за счёт резкого увеличения коэффициента связи с нагрузкой при трансформации моды $TE_{0,2}$ накопительного резонатора в моду $TE_{0,1}$ выходного тракта. Возрастание коэффициента трансформации достигается путём изменения фазы отражённой от резонатора переключателя волны при инжекции в него пучка электронов, генерируемых лезвийным катодом. Рассмотрим принцип работы компрессора. Он состоит из устройства связи 1 (входной и выходной волновод, в котором волна $TE_{0,2}$ не распространяется), входного рупора 2, параметры которого рассчитываются таким образом, чтобы волна $TE_{0,2}$ отражалась от него без трансформации в волну $TE_{0,1}$, отрезка цилиндрического волновода β с длиной 200 см и диаметром 8 см и волноводного переключателя 4–9. Входной

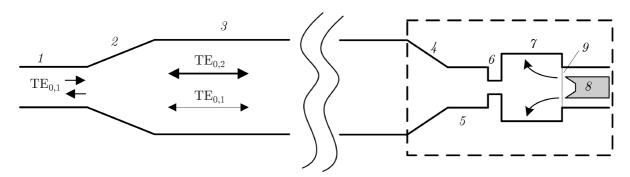


Рис. 1. Схема активного СВЧ компрессора на основе трансформации моды $TE_{0,2}$ в $TE_{0,1}$ с коммутатором, переключаемым пучком электронов: 1 — входной и выходной волновод, 2 — входной рупор, 3 — цилиндрический резонатор, 4 — коническое сужение, 5 — отрезок цилиндрического волновода, 6 — диафрагма, 7 — скачкообразное расширение волновода, 8 — катод, 9 — щелевой анод

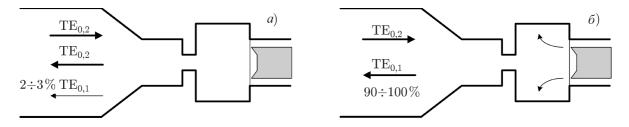


Рис. 2. Волноводный переключатель в режиме накопления (a) и вывода (b) энергии из компрессора. Изогнутыми линиями со стрелками условно показаны траектории электронов

рупор, цилиндрический волновод и переключатель образуют высокодобротный накопительный резонатор для моды $\mathrm{TE}_{0,2}.$

Переключатель состоит из конического сужения 4, отрезка цилиндрического волновода 5, закритического для моды $\mathrm{TE}_{0,2}$, диафрагмы 6 и отрезка волновода 7, закороченного с одной стороны тонкой медной стенкой с отверстиями, которая играет роль щелевого анода 9. Диафрагма 6, волновод 7 и щелевой анод 9 образуют низкодобротный резонатор переключателя. За анодом располагается цилиндрический лезвийный катод 8, на который подаётся импульс высокого напряжения.

Излучение на моде $TE_{0,1}$ цилиндрического волновода на частоте 11,4 $\Gamma\Gamma$ ц поступает внутрь накопительного резонатора компрессора. В режиме накопления энергии небольшая часть энергии волны $TE_{0,1}$ (около $2 \div 3$ %) трансформируется на конусе 4 в волны $TE_{0,2}$, которая полностью отражается от входного рупора 2 благодаря закритическому волноводу 1. В результате энергия СВЧ излучения накапливается в резонаторе компрессора на моде ТЕ_{0.2}. Волна ТЕ_{0.2} отражается от переключателя практически полностью, и лишь малая часть её энергии трансформируется обратно в волну $TE_{0.1}$ (рис. 2a). Последнее достигается взаимной компенсацией двух потоков излучения на волне ТЕ_{0.1}. Один формируется при отражении от конического сужения 4, а другой — от резонатора переключателя. Действительно, при отражении волны $\mathrm{TE}_{0.2}$ от конического сужения происходит её частичная трансформация в волну ТЕ_{0.1}, распространяющуюся в сторону входного рупора, и волну $TE_{0,1}$, распространяющуюся к резонатору переключателя. Коэффициент трансформации определяется при этом геометрическими размерами сужения 4. Для выбранных параметров резонатора переключателя длина волновода 5 подбирается так, чтобы волны TE_{0.1}, отражённые от конического сужения и настроенного в резонанс резонатора ¹ переключателя складывались на выходе компрессора в противофазе. В результате суммарный коэффициент трансформации волны ТЕ_{0.2} в волну ТЕ_{0.1} на переключателе, определяющий связь накопительного резонатора с подводящим трактом, составляет 2÷3 %. Такой коэффициент связи является оптимальным для накопления энергии в компрессоре при его возбуждении СВЧ импульсами с длительностью $1,0 \div 1,4$ мкс [8].

Геометрические размеры переключателя рассчитывались таким образом, чтобы в режиме накопления энергии рабочая частота компрессора совпадала с резонансной частотой переключателя. Следует отметить, что фаза отражённой от резонатора переключателя волны существенным образом зависит от того, находится резонатор в резонансе или нет. Поэтому расстройка этого резонатора приводит к резкому изменению коэффициента трансформации моды $TE_{0,2}$ в $TE_{0,1}$ и, соответственно, связи накопительного резонатора с подводящим трактом [6]. При подаче на катод импульса высокого напряжения возникает электронный пучок, который через анодную щель проникает в резонатор переключателя, изменяя его резонансную частоту. В результате происходит изменение фазы отражённой от этого резонатора волны $TE_{0,1}$. Волны, отражённые от

 $^{^{1}}$ Резонансная настройка резонатора осуществляется по его основной моде

резонатора переключателя и конического сужения, начинают складываться в фазе, а коэффициент трансформации моды $TE_{0,2}$ в $TE_{0,1}$ резко возрастает до значений, определяемых расстройкой резонатора. В результате накопленная в компрессоре на моде $TE_{0,2}$ энергия СВЧ импульса излучается через входной рупор на моде $TE_{0,1}$ (рис. 2δ). Максимальный коэффициент переключения (до 100~%) достигается в случае изменения фазы на 180° , когда волны складываются точно в фазе. В этом случае вся накопленная в компрессоре энергия выводится из него за время двойного пробега волны $TE_{0,1}$ вдоль накопительного резонатора. Таким образом, чем выше расстройка резонатора переключателя и соответствующий сдвиг фазы, тем больше коэффициент трансформации и, соответственно, коэффициент усиления по мощности компрессора $G=P/P_0$, определяемый как отношение мощности P0 в выходном (сжатом) импульсе к мощности P_0 входного импульса.

2. ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ РАБОТЫ ВОЛНОВОДНОГО ПЕРЕКЛЮЧАТЕЛЯ

Как было отмечено выше, коэффициент трансформации моды $TE_{0,2}$ в $TE_{0,1}$ в компрессоре, определяющий его коэффициент усиления по мощности, тесно связан с расстройкой резонатора переключателя и, следовательно, сильно зависит от характера взаимодействия электронного пучка с полем возбуждаемой в этом резонаторе моды. В линейном приближении вносимая электронным пучком расстройка может быть рассчитана с помощью теории возмущений [9]. Оценки [5, 6] показывают, что при нагруженной добротности резонатора переключателя $Q_L = 200 \div 400$ и напряжении между анодом и катодом 100 кВ компрессор может быть переведён в режим вывода энергии пучком электронов с током $200 \div 300$ А. Поскольку в режиме накопления энергии рабочая частота компрессора находится в резонансе с частотой переключателя, то электрическое поле в последнем выше, чем в накопительном резонаторе. Поэтому, начиная с некоторого уровня мощности входного излучения, может появиться эффект отражения инжектируемых электронов от высокочастотного потенциального барьера, возникающего в неоднородном поле резонатора переключателя [10]. Этот эффект может существенным образом повлиять на работу переключателя при высокой мощности входного излучения и изменить параметры компрессии.

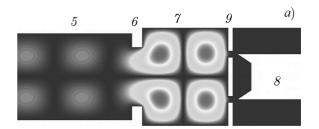
Как было показано в работах [11–14], если амплитуда колебаний заряженной частицы в неоднородном высокочастотном поле много меньше характерного размера области неоднородности, а скорость частицы такова, что за время пролёта этой области частица совершает много колебаний, то инвариантом движения является величина

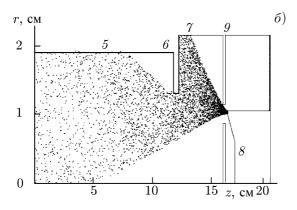
$$V^2/2 + \eta \Phi, \tag{1}$$

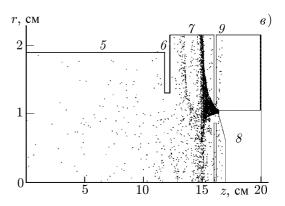
где V и η — скорость и удельный заряд частицы соответственно, $\Phi = \eta \, |E|^2/(4\omega^2)$ — высокочастотный потенциал, E — амплитуда напряжённости электрического поля в рассматриваемой точке, ω — круговая частота поля.

Инвариантность величины (1) означает, что возникающая в неоднородном высокочастотном поле пондеромоторная сила $\mathbf{F} = -e \, \nabla \Phi$, где e — элементарный заряд, препятствует проникновению электронов в область сильного электрического поля. Таким образом, область резонатора переключателя, внутри которой возбуждается стоячая электромагнитная волна, может оказаться непрозрачной для электронного пучка. Простейшие оценки показывают, что для параметров существующего компрессора [7] величина $e\Phi$ сравнивается с кинетической энергией электронов в пучке при мощности входного излучения 2,5 МВт. Однако такая оценка не учитывает реальную структуру моды в резонаторе и пространственную неоднородность взаимодействия пучка электронов с СВЧ полем. Поэтому для исследования этого эффекта было проведено численное

Рис. 3. Распределение амплитуды электрического поля в резонаторе переключателя в режиме накопления энергии непосредственно перед моментом инжекции пучка электронов (a) и пространственное распределение электронов в резонаторе переключателя при низком (b) и высоком (b) уровне мощности входного сигнала. Числа b-b на рисунке соответствуют обозначениям на рис. b0, b1, b2, b3, b4, b5, b6, b7, b8, b9, b9







моделирование работы переключателя при высоких полях в нём с помощью метода частиц (код KARAT) [15]. Данный код позволял рассчитывать динамику и структуру СВЧ поля в резонаторе переключателя, а также распределение пучка электронов в резонаторе с учётом пространственного заряда и взаимодействия электронов с модой резонатора.

В расчёте размеры резонатора переключателя выбирались таким образом, чтобы он находился в резонансе с рабочей частотой компрессора 11,4 ГГц. При этом в переключателе возбуждалась мода ТЕ_{0.1.2}. Структура электрического поля в резонаторе переключателя в режиме накопления энергии в компрессоре представлена на рис. 3a. После установления колебаний в резонаторе переключателя в него инжектировался пучок электронов, при этом разность потенциалов между катодом и анодом предполагалась равной 100 кВ. Сила тока пучка и мощность СВЧ излучения варьировались в процессе расчётов. Была вычислена пороговая мощность СВЧ излучения, начиная с которой высокочастотный потенциал оказывает существенное влияние на прохождение пучка электронов через резонатор переключателя. На рис. 36 показано характерное распределение макрочастиц в объёме резонатора при низкой мощности входного излучения. Отметим, что данное распределение остаётся неизменным в течение всего времени переключения (т. е. инжекции пучка). В этом случае пучок заполняет объём резонатора переключателя без перераспределения и накопления пространственного заряда. Пространственное распределение электронов при высокой мощности СВЧ излучения, когда СВЧ потенциал оказывает существенное влияние на динамику переключения, представлено на рис. Зв. Из него видно, что в процессе переключения пучок «останавливается», электроны отражаются от области, где величина $e\Phi$ превосходит их кинетическую энергию. Это приводит к накоплению заряда внутри резонатора переключателя. Тем не менее, такое взаимодействие также сопровождается сдвигом резонансной частоты переключателя и выходом его из резонанса, но с некоторым запаздыванием. После выхода из резонанса и падения амплитуды поля в резонаторе переключателя пространственное распределение электронов для высокой мощности СВЧ излучения перестаёт отличаться от распределения, приведённого на рис. 3б.

В процессе расчётов определялись также изменения фазы arphi и коэффициента отражения Rэлектромагнитной волны ТЕ_{0.1} от резонатора переключателя в зависимости от мощности входного СВЧ излучения. Расчётная зависимость этих параметров для «низкой» и «высокой» мощности при фиксированном токе электронного пучка представлена на рис. 4. При этом период времени от t=0 до t=25 нс соответствует установлению колебаний в резонаторе переключателя. В момент времени t=25 нс внутрь резонатора переключателя инжектируется пучок электронов. При этом резонатор начинает выходить из резонанса и фаза отражённой от него волны изменяется. Сдвиг фазы зависит от тока пучка, разности потенциалов между катодом и анодом и характера взаимодействия пучка с СВЧ полем в резонаторе. В расчёте ток электронного пучка задавался равным 200 А, а разность потенциалов составляла 100 кВ. Кривые 1 на рис. 4 соответствуют мощности входного импульса 1 МВт, при которой СВЧ потенциал ещё не оказывает влияния на переключение коммутатора. Однако при увеличении мощности входного импульса до 3 МВт (кривые 2) наличие СВЧ потенциала начинает приводить к изменению динамики переключения. Из рис. 4 видно, что взаимодействие пучка электронов с СВЧ излучением при высокой мощности последнего становится менее эффективным, а изменения фазы отражённой волны и коэффициента отражения — менее значительными и более плавными. В конечном итоге это должно приводить к уменьшению коэффициента усиления по мощности, обеспечиваемого компрессором.

Для детального исследования влияния высокочастотного потенциала на параметры сжатого импульса проводилось полное численное моделирование работы компрессора. Динамика распределения СВЧ полей в компрессоре рассчитывалась методом конечных разностей во временной области (Finite Difference Time Domain, FDTD) [16] с более крупным по сравнению с методом частиц пространственным шагом, что позволяло существенно уменьшить время расчёта. На входе компрессора (рис. 1) задавался прямоугольный СВЧ импульс с длительностью 1 мкс. Мощность импульса варьировалась в процессе расчёта. Параметры компрессора соответствовали параметрам, приведённым в работах [6, 7]. К концу импульса накопленная в компрессоре энергия достигала максимума. В этот момент в резонатор переключателя инжектировался пучок электронов. Электронный пучок моделировался заданием в методе FDTD стороннего тока, предварительно

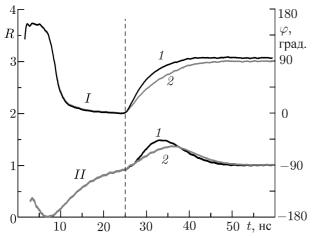


Рис. 4. Изменение коэффициента отражения (кривые I) и фазы (кривые II) волны, отражённой от волноводного переключателя: кривые 1 соответствуют мощности входного импульса 1 МВт (влияние СВЧ потенциала незначительно), 2 — мощности входного импульса 3 МВт (СВЧ потенциал влияет на работу переключателя)

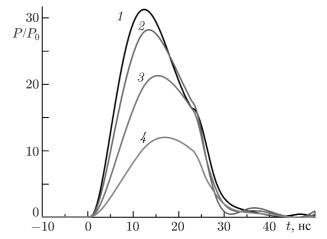


Рис. 5. Сравнение формы и амплитуды сжатых импульсов при различной мощности входного излучения: кривая 1 — мощность входного излучения 1 МВт (влияние СВЧ потенциала отсутствует), 2 — 3 МВт, 3 — 4 МВт, 4 — 5 МВт

рассчитанного с помощью кода КАRAT, для заданной мощности СВЧ излучения. Форма импульса тока и его длительность подбирались близкими к используемым в экспериментах [5, 6]. После инжекции пучка электронов накопленная в резонаторе на моде $TE_{0,2}$ энергия СВЧ импульса излучалась через входной рупор на моде $TE_{0,1}$ в виде сжатого импульса. Результаты расчёта формы и амплитуды сжатых импульсов при фиксированном токе пучка и различной мощности входного излучения приведены на рис. 5. Из него следует, что, начиная с мощности входного излучения около 3 МВт, взаимодействие электронного пучка с высокочастотным потенциалом приводит к уменьшению коэффициента усиления и увеличению длительности переднего фронта сжатого импульса.

Следует отметить, что наблюдаемое в расчётах снижение коэффициента усиления под влиянием высокочастотного потенциала происходило без существенного увеличения длительности сжатого импульса. Это связано с тем, что время переключения компрессора практически совпадало с длительностью импульса тока, используемой в расчётах. В результате длительность сжатого импульса определялась длительностью тока пучка, а эффективность вывода энергии из накопительного резонатора уменьшалась.

3. СРАВНЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ РАСЧЁТА И ЭКСПЕРИМЕНТА

Экспериментальное исследование работы волноводного переключателя проводилось при высокой мощности СВЧ излучения в составе двухканального компрессора импульсов. Схема эксперимента была аналогичной приведённой в работах [6, 7]. В качестве СВЧ генератора использовался магникон [17, 18] с рабочей частотой 11,43 ГГц, мощностью до 9 МВт и длительностью импульса $\tau=1,0\div1,4$ мкс. Компрессор состоял из двух идентичных каналов (рис. 1), объединённых элементом ввода-вывода энергии, на основе 3-децибелового направленного ответвителя [4]. Использование последнего позволяло исключить влияние отражённого сигнала на режим генерации магникона и осуществлять когерентное сложение сжатых в каждом из каналов импульсов на выходе компрессора. Накопительный резонатор каждого канала был образован отрезком цилиндрического волновода с длиной 210 см и диаметром 8 см. Нагруженные добротности накопительного резонатора $Q_{\rm C}$ и резонатора переключателя $Q_{\rm S}$ составляли $2\cdot10^4$ и 380 соответственно. Эффективность накопления энергии в компрессоре достигала 70 %. Следует также отметить, что в двухканальном компрессоре мощность СВЧ излучения, приходящаяся на каждый из каналов, снижается в два раза и, следовательно, в два раза возрастает мощность входного излучения, начиная с которого СВЧ потенциал начинает влиять на переключение.

Переключение компрессора из режима накопления энергии СВЧ излучения в режим вывода осуществлялось с помощью коммутаторов, переключаемых пучком электронов. Для создания последнего использовался генератор импульсов с отрицательной полярностью и треугольной формой с амплитудой 100 кВ и длительностью по основанию 50 нс. Такие импульсы подавались одновременно на катоды обоих переключателей в момент окончания импульса магникона, когда накопленная энергия в компрессоре достигала максимальной величины. Для снижения порога и увеличения тока эмиссии использовались лезвийные молибденовые катоды с алмазным покрытием [19]. При подаче на катоды импульса высокого напряжения в резонаторы переключателей инжектировался пучок электронов. При этом коэффициент трансформации моды $TE_{0,2}$ в $TE_{0,1}$ резко возрастал и накопленная в резонаторе компрессора энергия излучалась через направленный ответвитель в нагрузку. Следует отметить, что при высоком напряжении на катоде эмиссия электронов может приобретать взрывной характер [20]. Этот процесс приводит к появлению на поверхности катода плазменных образований, возникающих при взрыве микроострий. При этом диффузия прикатодной плазмы в резонатор переключателя также может способствовать измене-

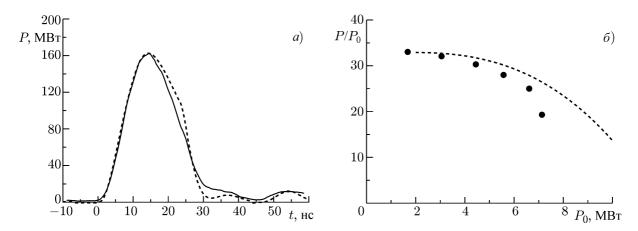


Рис. 6. Сравнение экспериментальной (сплошная кривая) и расчётной (пунктирная кривая) формы сжатого СВЧ импульса при мощности входного импульса $P_0=6.5~\mathrm{MBr}$ (a); зависимость коэффициента усиления двухканального компрессора от мощности входного СВЧ импульса: точки соответствуют экспериментальным данным, пунктирная кривая — результатам расчёта (δ)

нию его резонансной частоты [5]. Однако характерная скорость разлёта плазмы составляет величину порядка $(1\div 2)\cdot 10^6$ см/с [20]. Поэтому этот процесс является существенно более медленным по сравнению с переключением, вызываемым непосредственно пучком электронов, и не оказывает существенного влияния на параметры переключения. Характерное время жизни плазмы определяется процессами рекомбинации, а также её диффузионным разлётом и исчезновением на стенках переключателя и, как показывают оценки, не превышает 100 мкс. Таким образом, прикатодная плазма не влияет на процесс переключения, но может определять предельную частоту повторения импульсов компрессора.

Форма и мощность сжатых и входных импульсов детектировалась с помощью направленных ответвителей и калиброванных детекторов. В эксперименте были получены сжатые импульсы с мощностью до 165 МВт, длительностью около 20 нс при коэффициенте усиления по мощности порядка 25 и коэффициенте полезного действия около 60 %. Характерная осциллограмма сжатого импульса при мощности входного излучения $P_0=6,5$ МВт приведена на рис. 6a. На этом же рисунке показан вид сжатого импульса, рассчитанный с учётом взаимодействия электронного пучка с сильным СВЧ полем в переключателе компрессора. Результаты расчёта совпадают с экспериментальными данными при амплитуде импульса тока пучка I=175 A (в эксперименте ток пучка не измерялся).

Как и ожидалось, в эксперименте наблюдалось влияние мощности падающего излучения на параметры компрессии. Экспериментальная и расчётная зависимости коэффициента усиления G от мощности входного импульса приведены на рис. 6 δ . Из него видно, что при параметрах используемого в эксперименте двухканального компрессора коэффициент усиления начинает достаточно резко уменьшаться с некоторого порогового уровня мощности входного излучения $P_{\rm t} \sim 4\div 5~{\rm MBt}$. Расчёты показывают, что этот эффект связан с нелинейным характером взаимодействия пучка электронов с СВЧ полем в резонаторе переключателя. Отличие экспериментальных данных от расчётов может быть связано с накоплением пространственного заряда и изменением импульса тока в процессе переключения, которое сложно учесть в процессе расчёта. Отметим, что наблюдаемое снижение коэффициента усиления мощных активных компрессоров, переключаемых пучком электронов, которое связано с влиянием СВЧ потенциала на прохождение пучка электронов через резонатор переключателя, наиболее ярко проявляется при относительно небольшой длительности сжатых импульсов. При увеличении длительности импульсов (напри-

мер, путём увеличения длины накопительного резонатора) инжекция пучка электронов приводит к расстройке и быстрому уменьшению СВЧ полей в резонаторе переключателя, в результате чего влияние высокочастотного потенциала проявляется только на переднем фронте выходного импульса. Поэтому при использовании в качестве накопительных резонаторов длинных линий задержек (типа SLAC [2, 3]) с временем двойного пробега порядка 100 нс наблюдаемый эффект не должен оказывать влияния на работу компрессора при высокий мощности СВЧ излучения. Порог мощности можно также повысить, снижая поля в резонаторе переключателя (уменьшая его добротность) или увеличивая ускоряющее напряжение пучка электронов. Так, расчёты показывают, что для параметров двухканального компрессора, используемого в экспериментах, уменьшение добротности резонатора переключателя с $Q_{\rm S1}=380$ до $Q_{\rm S2}=150\div200$ должно приводить к возрастанию пороговой мощности, начиная с которой происходит падение коэффициента усиления, с $4\div5$ до 9 МВт. В этом случае при ускоряющем напряжении 100 кВ и увеличении тока пучка (примерно в $Q_{\rm S1}/Q_{\rm S2}$ раз) мощность выходных импульсов компрессора может быть поднята до уровня $300\div400$ МВт при сохранении той же эффективности компрессии.

4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе рассмотрено влияние нелинейного взаимодействия пучка электронов с высокочастотным полем в волноводном переключателе на выходные параметры мощного активного компрессора СВЧ импульсов. Показано, что при высокой мощности входного излучения эффект выталкивания электронов из области неоднородного высокочастотного поля может приводить к снижению коэффициента усиления по мощности и удлинению переднего фронта сжатого импульса. Разработана численная модель, позволяющая адекватно описывать данные эксперимента и определять предельные параметры компрессора в зависимости от уровня мощности входного излучения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- 1. Диденко А. Н., Юшков Ю. Г. Мощные СВЧ импульсы наносекундной длительности. М.: Энергоатомиздат, 1984. 112 с.
- 2. Tantawi S. G., Nantista C. D., Dolgashev V. A., et al. // Phys. Rev. ST Accel. & Beams. 2005. V. 8. Art. no. 042002.
- 3. Tantawi S. G., Ruth R. D., Vlieks A. E., Zolotarev M. // AIP Conf. Proc. 398. Lake Tahoe, CA. 1997. P. 813.
- 4. Вихарев А. Л., Горбачев А. М., Иванов О. А. и др. // Изв. вузов. Радиофизика. 2008. Т. 51, \mathbb{N}^2 8. С. 660.
- 5. Ivanov O. A., Isaev V. A., Lobaev M. A., et al. // Appl. Phys. Lett. 2010. V. 97. Art. no. 031501.
- 6. Ivanov O. A., Isaev V. A., Lobaev M. A., et. al. // Phys. Rev. ST. Accel & Beams. 2011. V. 14. Art. no. 061301.
- 7. Ivanov O. A., Lobaev M. A., Vikharev A. L., et al. // Phys. Rev. Lett. 2013. V. 110. Art. no. 115002.
- 8. Alvarez R. A. // Rev. Sci. Instruments. 1986. V. 57, No. 10. P. 2481.
- 9. Голант В. Е. Сверхвысокочастотные методы исследования плазмы. М.: Наука, 1968. 327 с.
- 10. Еремин Б. Г., Моченев С. Б. // Приборы и техника эксперимента. 1963. № 3. С. 108.
- 11. Гапонов А. В., Миллер М. А. // ЖЭТФ. 1958. Т. 34. С. 242.
- 12. Миллер М. А. // Изв. вузов. Радиофизика. 1958. Т. 1, № 3. С. 110.
- 13. Миллер М. А. // ЖЭТФ. 1958. Т. 34. С. 751.
- 14. Миллер М. А. // Изв. вузов. Радиофизика. 1959. Т. 2, № 3. С. 438.

- 15. Tarakanov V. P. User's manual for code KARAT. Springfield, USA: Berkeley Research Associates, Inc., 1992. 127 p.
- 16. Taflove A. Advances in computational electrodynamics: the finite-difference time-domain method. Boston: Artech House, 1998. 735 p.
- 17. Gold S. H., Nezhevenko O. A., Yakovlev V. P., et. al. // AIP Conf. Proc. 474. New York: American Institute of Physics, 1999. P. 179.
- 18. Nezhevenko O. A., Yakovlev V. P., Hirshfield J. L., et. al. // Proc. Particle Accelerator Conf. 29 March 2 April 1999. Piscataway, New Jersey: IEEE, 2000. V. 2. P. 1049.
- 19. Иванов О. А., Лобаев М. А., Чернов В. В. и др. // Изв. вузов Радиофизика. 2014. Т. 57, $\mathbb M$ 10. С. 797.
- 20. Месяц Г. А., Проскуровский Д. И. Импульсный электрический разряд в вакууме. Новосибирск: Наука, 1984. 256 с.

Поступила в редакцию 26 февраля 2015 г.; принята в печать 18 июня 2015 г.

A STUDY OF INTERACTION OF AN ELECTRON BEAM WITH A STRONG HIGH-FREQUENCY FIELD IN THE WAVEGUIDE SWITCH OF A HIGH-POWER MICROWAVE COMPRESSOR

M. A. Lobaev, O. A. Ivanov, A. L. Vikharev, A. M. Gorbachev, and V. A. Isaev

We present the results of simulating numerically the operation of a high-power active compressor of microwave radiation pulses in the 3-cm wavelength band with a waveguide switch activated by an electron beam. The influence of the nonlinear character of electron beam interaction with the high-frequency field in the switch on the output parameters of the compressor is discussed, and the results of the calculation are compared with the experimental data. It is shown that at a high power of the input radiation, the effect of electron expulsion from the region of the inhomogeneous field in the switch can lead to a decrease in the compressor amplification coefficient and elongation of the leading front of the compressed pulse.