

Работа выполнена в Институте прикладной физики РАН  
(г. Нижний Новгород)

*На правах рукописи*

ВИХАРЕВ Александр Анатольевич

**КВАЗИОПТИЧЕСКИЕ КОМПРЕССОРЫ  
МОЩНЫХ МИКРОВОЛНОВЫХ ИМПУЛЬСОВ**

01.04.04 – физическая электроника

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата физико-математических наук

Нижний Новгород – 2011

**Научный руководитель**

кандидат физико-математических наук  
С.В. Кузиков

**Официальные оппоненты**

доктор физико-математических наук  
С. В. Самсонов

кандидат физико-математических наук  
Г.Д. Богомолов

**Ведущая организация**

Институт электрофизики УрО РАН

Защита состоится 27 июня 2011 г. в 15 часов на заседании диссертационного совета Д 002.069.02 в Институте прикладной физики РАН (603950 г. Нижний Новгород, ул. Ульянова, 46).

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Института прикладной физики Российской академии наук.

Автореферат разослан «\_\_» \_\_\_\_\_ 2011 г.

Ученый секретарь диссертационного совета  
доктор физико-математических наук,  
профессор



Ю. В. Чугунов

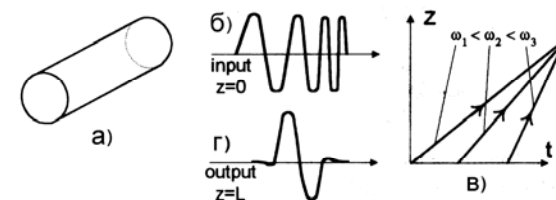
## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

### Предмет исследования и актуальность темы

В настоящее время приборы вакуумной СВЧ-электроники, как источники когерентного микроволнового излучения большой мощности, используются в различных областях науки и техники, таких как: управляемый термоядерный синтез (УТС), ускорители частиц, радиолокация и связь, плазмохимический синтез и микроволновая обработка материалов. Наиболее яркие примеры – применение гиротронов в установках УТС [1], клистронов – в ускорителях заряженных частиц [2], магнетронов – в установках плазмохимического синтеза и модификации материалов [3]. В некоторых из перечисленных областей (ускорительная техника, радиолокация) применяются также компрессоры СВЧ-импульсов, позволяющие увеличивать мощность электромагнитного излучения за счет укорочения длительности импульса.

Существуют два типа компрессоров – пассивные и активные. В пассивных компрессорах сжатие микроволнового импульса происходит при его прохождении через диспергирующую среду. Принцип действия пассивного компрессора [4] на основе отрезка полого металлического волновода поясняется на Рис. 1. Групповая скорость электромагнитной волны в цилиндрическом волноводе зависит от частоты. Если на вход волновода подается СВЧ-импульс с частотной модуляцией, то разные спектральные участки этого импульса распространяются со своими групповыми скоростями. Подбором частотной модуляции и длины волновода можно добиться того, что различные спектральные компоненты достигнут выхода волновода одновременно. В результате импульс вырастет по амплитуде при соответствующем сокращении длительности. Полый металлический волновод обладает сильной частотной дисперсией только вблизи его критической частоты. Это, во-первых, затрудняет согласование таких компрессоров с внешними трактами, а во-вторых, из-за неквадратичного закона дисперсии, затрудняет достижение высокой эффективности компрессии. Поэтому в качестве диспергирующей среды в некоторых случаях используется волновод с постоянной или меняющейся по определенному закону гофрировкой поверхности [4–6].

В ускорительной технике более широкое распространение получили пассивные компрессоры, увеличение мощности в которых достигается за счет сжатия прямоугольного импульса при быстром изменении на 180 градусов фазы СВЧ-излучения, возбуждающего резонатор или резонансную линию задержки [7, 8].



**Рис. 1.** Пассивный компрессор на основе отрезка гладкого волновода: а) волновод; б) входной сигнал – СВЧ-импульс с частотной модуляцией; в) распространение спектральных компонент импульса в зависимости от времени; г) сжатый импульс на выходе волновода

Известные пассивные компрессоры такого типа SLED [7] и SLED-II [8] были разработаны в Стэнфордском ускорительном центре (SLAC). Система компрессии SLED использует в качестве накопителя энергии на частоте 2,86 ГГц два идентичных цилиндрических резонатора, объединенных трехдецибельным направленным ответвителем. Излучение от СВЧ-источника поступает на вход 3-дБ направленного ответвителя, делится в нем на два потока со сдвигом фазы друг относительно друга в  $\Delta\varphi = 90^\circ$  и через отверстия связи запитывает два идентичных резонатора. Отраженные от диафрагмы сигналы взаимно компенсируются во входном и складываются в выходном плече трехдецибельного ответвителя. Когда излучение в резонаторах накопится, фаза входного сигнала инвертируется на величину  $\Delta\varphi = 180^\circ$  градусов. При этом волна, вытекающая из резонатора, складывается в фазе с сигналом, отраженным от диафрагмы, увеличивая мощность выходного СВЧ-излучения. Предельный коэффициент усиления по мощности при таком методе компрессии составляет 9 раз, однако эффективность сжатия невелика. Максимальная мощность сжатого импульса, которая была получена в экспериментах с пассивным компрессором SLED на частоте 2,86 ГГц, составила 390 МВт при коэффициенте усиления по мощности равном всего 2,6, но с относительно высокой эффективностью (50%) [9].

Одна из наиболее эффективных модификаций компрессора SLED – VPM основана на использовании единственного резонатора – открытого бочкообразного резонатора, возбуждаемого на моде «шепчущей галереи» [10, 11]. С помощью такой системы компрессии, не требующей, в отличие от оригинальной системы SLED дополнительных развязок, были получены сжатые импульсы мощностью до 150 МВт на частоте 11,4 ГГц при коэффициенте усиления по мощности равном 3,1 [12]. Дальнейшее увеличение выходной мощности ограничено электропрочностью системы отверстий связи, с помощью которой возбуждалась рабочая мода «шепчущей галереи».

Одним из основных недостатков системы SLED и ее модификаций является экспоненциальная форма сжатого импульса. Система компрессии SLED-II, являющаяся развитием системы SLED, использует две длинных

резонансных линии задержки, Рис. 2. Вывод энергии из компрессора осуществляется за время двойного пробега волны по линии задержки, поэтому система компрессии SLED-II обеспечивает такую форму сжатого импульса, при которой потребляемая (наибольшая) часть выходного излучения имеет постоянную амплитуду и фазу. Длина линии  $L$  определяется заданной длительностью этого участка импульса  $\tau$ , под который разрабатывается система:  $L = V_{гр}\tau/2$ , где  $V_{гр}$  – групповая скорость волны в линии. Энергия в течение большей части длительности исходного импульса ( $T - \tau$ ) накапливается в резонансных линиях задержки, а затем в течение времени порядка  $\tau$  выводится в нагрузку после быстрого (в масштабе  $\tau$ ) изменения фазы входного сигнала на величину  $180^\circ$  градусов. Максимальная мощность сжатого импульса, которая была получена в системе пассивной компрессии SLED-II на частоте 11,4 ГГц, составляла 580 МВт при коэффициенте усиления по мощности равном 3 [13].

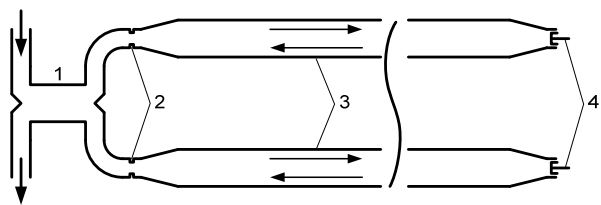


Рис. 2. Компрессор SLED-II: 1 – 3-дБ направленный ответвитель, 2 – диафрагмы связи, 3 – линии задержки, 4 – настройка частоты

Активные компрессоры СВЧ-импульсов при тех же габаритах, что и пассивные компрессоры, позволяют в принципе достичь более высоких коэффициентов усиления по мощности при сохранении высокой эффективности [14, 15]. Метод активной компрессии основан на накоплении электромагнитной энергии в высокодобротном резонаторе, где интенсивности полей могут многократно превышать интенсивность поля в исходном импульсе, и ее последующем быстром выводе в нагрузку с помощью коммутатора (переключателя), модулирующего добротность резонатора. Большой коэффициент сжатия, высокая пиковая мощность и эффективность компрессии делают активные СВЧ-компрессоры весьма привлекательными для использования в линейных ускорителях заряженных частиц.

Известен достаточно большой цикл работ, посвященных активной компрессии в диапазоне длин волн от 3 см до 100 см, в которых для накопления СВЧ-энергии использовались объемные резонаторы на основе одномодовых волноводов, а для вывода энергии (модуляции добротности) применялись интерференционные коммутаторы – электрически управляемые или работающие на самопробое волноводные Н-тройники [16–23], Рис. 3.

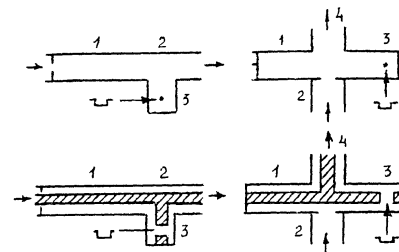


Рис. 3. Схемы компрессоров на основе одномодовых волноводов и интерференционного коммутатора. 1 – накопительный резонатор, 2 – Н-тройник. 3 – газоразрядный ключ, 4 – выходной волновод

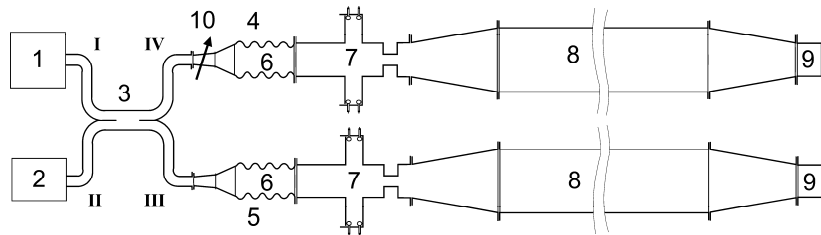
В интерференционном коммутаторе, выполненном на одномодовом волноводе с разрядным промежутком в короткозамкнутом плече, в режиме накопления энергии возникает стоячая электромагнитная волна. Узел этой волны так расположен относительно выходного плеча тройника, что обеспечивает слабую связь с нагрузкой. Для переключения резонатора в режим вывода СВЧ-энергии создается электрический разряд с высокой концентрацией электронов на расстоянии  $\lambda/4$  от короткозамкнутого плеча Н-тройника. Появление плазмы приводит к резкому изменению картины стоячих волн в выходном плече коммутатора, что обеспечивает быстрый вывод СВЧ-энергии к нагрузке. Разряд может создаваться как в кварцевой трубке, так и непосредственно в объеме резонатора (самопробой), или инициируется с помощью внешнего источника высоковольтного напряжения.

При переходе от накопительных резонаторов с размерами, сравнимыми с длиной волны, к сверхразмерным резонаторам в таких активных компрессорах удалось увеличить коэффициент усиления по мощности до 10–30 раз за счет уменьшения омических потерь и, соответственно, увеличения нагруженной добротности резонатора [23]. Однако, используемый в компрессоре интерференционный коммутатор, обеспечивающий связь сверхразмерного резонатора с выходным трактом с помощью одномодового прямоугольного волновода, ограничивал минимальную достижимую добротность резонатора в режиме вывода энергии. Поэтому значительная доля энергии не выводилась из резонатора. В результате в экспериментах на длинах волн 3-см и 10-см при возбуждении таких компрессоров была получена эффективность компрессии не более 45% [22]. Для применения компрессоров в линейных ускорителях заряженных частиц приемлемое значение КПД компрессии составляет не менее 60% [24].

Для получения мощных сжатых импульсов с высокой эффективностью компрессии в другом цикле работ, выполненных в ИПФ РАН, было предложено использовать в активных компрессорах сверхразмерные цилиндрические резонаторы, возбуждаемые на осесимметричных модах типа  $TE_{0n}$ , имеющих низкие омические потери, а вывод энергии осуществлять с помощью электрически управляемого рефлектора в виде скачкообразного

расширения круглого волновода [25–28]. В работах [25–28] компрессор представлял собой секцию сверхразмерного волновода круглого поперечного сечения на рабочей моде  $TE_{01}$ , ограниченную с одной стороны брегговским рефлектором, а с другой – управляемым коммутатором. Излучение СВЧ-генератора поступало в накопительный резонатор через входной брегговский рефлектор [29, 30], а выводилось – через второй выходной рефлектор. В скачкообразном расширении круглого волновода помещались одна или две газоразрядные кварцевые трубки, имеющие форму кольца с внешним диаметром равным диаметру расширенного волновода. Трубки на диаметрально противоположных концах кольца имели электроды, выходящие через отверстия в боковых стенках из переключателя. При подаче на электроды высоковольтных импульсов и появлении плазмы в трубках резонансная кривая переключателя смещалась в область рабочей частоты компрессора, что обеспечивало необходимое увеличение коэффициента пропускания и вывод СВЧ-излучения из накопительного резонатора.

Наилучшие результаты в этой системе компрессии были получены при переходе от одноканальной схемы (без развязки) к двухканальной с использованием трехдецибелного направленного ответвителя для развязки между СВЧ-источником и компрессором (Рис. 4). В данной конструкции каждый канал представлял собой одноканальный компрессор на моде  $TE_{01}$  круглого волновода. Переключение компрессора из режима накопления энергии в режим вывода осуществлялось с помощью электрически управляемых переключателей на основе скачкообразного расширения цилиндрического волновода, которые служили объединенным элементом ввода-вывода СВЧ-энергии. С помощью двухканального компрессора с объединенным элементом ввода-вывода энергии были получены сжатые импульсы мощностью 53 МВт и длительностью 60 нс на частоте 11,4 ГГц. При этом коэффициент усиления по мощности равнялся 11, а эффективность компрессии достигала 56% [28].



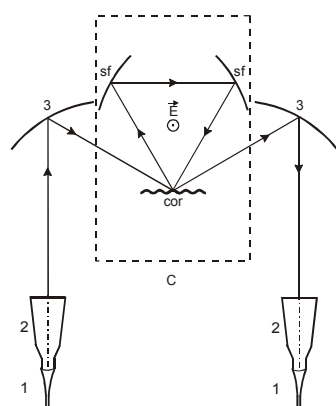
**Рис. 4.** Схема активного двухканального компрессора: 1 – СВЧ-генератор, 2 – согласованная нагрузка, 3 – 3-дБ делитель мощности, 4 – первый канал компрессора, 5 – второй канал компрессора, 6 – преобразователь моды  $TE_{01}$ , 7 – входной и выходной электрически управляемый рефлектор, 8 – накопительный резонатор, 9 – рефлектор, 10 – фазовращатель

Несмотря на значительный прогресс, компрессоры с плазменными коммутаторами в 3-см диапазоне длин волн имеют КПД и коэффициент усиления по мощности, все еще далекие от необходимых для использования этих активных компрессоров в линейных ускорителях заряженных частиц. Ограничение выходной мощности и КПД компрессоров связаны, прежде всего, с разрядными явлениями (самопробой), возникающими в плазменном переключателе на основе скачкообразного расширения цилиндрического волновода [31], а также с недостаточно высокой омической добротностью накопительных резонаторов из-за потерь в переключателе. Отмеченные проблемы усиливаются при использовании такого рода конструкций активных компрессоров на более коротких длинах волн. Для создания активных компрессоров, в частности, в миллиметровом диапазоне длин волн, где имеются мощные источники СВЧ, например, магникон [32, 33], необходима разработка новых компонентов [34], коммутаторов и систем компрессии с использованием методов квазиоптики [35–39]. В этом диапазоне длин волн используются квазиоптические волноводные тракты, в которых распространение электромагнитных волн осуществляется в виде гауссовых волновых пучков и собственных мод сверхразмерных волноводов. Для эффективного переключения таких волновых пучков также естественно использовать квазиоптические коммутаторы, а компрессоры создавать на основе сверхразмерных, в частности, многозеркальных накопительных резонаторов. Такие компрессоры обладают определенными преимуществами по сравнению с компрессорами на основе волноводных накопительных резонаторов. В многозеркальном резонаторе путем селекции мод можно обеспечить эффективное подавление всех паразитных колебаний при сохранении высокой добротности рабочего колебания. Коммутатор в этом случае становится распределенным, следовательно, можно снизить напряженность поля на нем, что уменьшает вероятность высокочастотного пробоя.

Применение квазиоптических резонаторов достаточно подробно анализировалось в последнее время в целях создания пассивных компрессоров микроволновых импульсов [40–44]. В таких пассивных компрессорах, например, на основе трехзеркального накопительного резонатора, элемент связи (гофрированное металлическое зеркало [41, 42]) обеспечивает связь резонатора с входным и выходным волновыми пучками (Рис. 5). Сжатие СВЧ-импульса достигается, как и в компрессоре SLED, за счет переворота фазы на 180 градусов во входном импульсе или за счет частотной модуляции исходного импульса. Такие компрессоры исследовались на низком уровне мощности на частоте 34 ГГц [41, 42].

Для исследований компрессоров на основе многозеркальных резонаторов на высоком уровне мощности предлагалось использовать мощный СВЧ-усилитель – магникон на частоте 34 ГГц. Однако магникон из-за узкой полосы усиления не обладает возможностью быстро изменять на 180 градусов фазу своего излучения или создавать частотно-модулированные им-

пульсы с достаточно высокой скоростью перестройки частоты. По этой причине разработанные для экспериментов с магником пассивные компрессоры микроволновых импульсов оказались не востребованными до настоящего времени.



**Рис. 5.** Схема пассивного компрессора на основе трехзеркального резонатора: 1 – переход с прямоугольного на круглый волновод, 2 – рупор, преобразующий  $TE_{11}$  моду в гауссов пучок, 3 – передающее зеркало, C – трехзеркальный резонатор, cor – гофрированное зеркало, sf – фокусирующие зеркала

Эффективная компрессия импульсов источников излучения с недостаточно широкой полосой усиления, таких как магникон, все же представляется возможной. Для этого требуется разработка активного коммутатора-фазовращателя (как отдельного, самостоятельного элемента) с целью создания фазовой модуляции (в частности, скачкообразного изменения фазы на  $180^\circ$ ) во входном для компрессора СВЧ-импульсе. Эта задача решалась при выполнении данной диссертационной работы.

Создание электрически управляемых коммутаторов, модулирующих добротность многозеркальных накопительных резонаторов, для активных компрессоров СВЧ-импульсов мм-диапазона длин волн до настоящего времени обсуждалось в ограниченном числе работ [45–47]. Предлагаемые в этих работах распределенные активные коммутаторы с использованием набора диэлектрических трубок являются технически трудно реализуемыми из-за неоднородности стенок и прогиба тонких и длинных трубок. Поэтому для создания квазиоптических компрессоров необходима разработка и исследование новых коммутаторов, эффективно работающих в коротковолновом диапазоне длин волн.

Создание электрически управляемых коммутаторов, модулирующих добротность многозеркальных накопительных резонаторов, для активных компрессоров СВЧ-импульсов мм-диапазона длин волн до настоящего времени обсуждалось в ограниченном числе работ [45–47]. Предлагаемые в этих работах распределенные активные коммутаторы с использованием набора диэлектрических трубок являются технически трудно реализуемыми из-за неоднородности стенок и прогиба тонких и длинных трубок. Поэтому для создания квазиоптических компрессоров необходима разработка и исследование новых коммутаторов, эффективно работающих в коротковолновом диапазоне длин волн.

**Целью** настоящей диссертационной работы являются:

1) разработка и исследование новых коммутаторов для переключения направления распространения волнового пучка или изменения фазы СВЧ-излучения большой мощности на основе:

- распределенных дифракционных решеток с изменяемыми параметрами за счет создания плазмы в каналах решетки;
- резонаторов и решеток, содержащих полупроводник, переключаемый оптическим излучением за счет эффекта индуцированной фотопроводимости;
- резонаторов с модулированием добротности путем инжектирования электронного пучка;

2) создание и исследование на основе разработанных переключателей активных квазиоптических компрессоров СВЧ-импульсов;

3) разработка эффективных пассивных компрессоров СВЧ-импульсов на основе компактных накопительных резонаторов;

4) создание и исследование необходимых вспомогательных электродинамических компонентов СВЧ-компрессоров (устройств ввода-вывода излучения, поворотов, нагрузок, дистанционно управляемых волноводных переключателей и фазовращателей).

### Научная новизна работы

В диссертационной работе получены следующие новые результаты.

Созданы новые коммутаторы СВЧ-излучения:

- на основе диэлектрической пластины, позволяющей изменять параметры дифракционного излучения за счет создания плазмы в пазах диэлектрика,
- на основе индуцированной фотопроводимости путем облучения кремниевого диска лазерным излучением,
- на основе резонатора с модулированной добротностью путем внесения в резонансный объем электронного пучка.

На основе коммутатора в виде дифракционной решетки реализован компрессор импульсов на частоте 34 ГГц с трехзеркальным резонатором, позволяющим работать на мультимегаваттном уровне мощности.

Создан компактный пассивный компрессор СВЧ-импульсов, основанный на линии задержки, работающей на комбинации осесимметричных электропрочных мод, обладающих малыми омическими потерями.

Созданы высокоэффективные повороты на моде  $TE_{01}$  волновода круглого поперечного сечения, дистанционно управляемые фазовращатель и волноводный переключатель мощности.

### Положения, выносимые на защиту

1. Дифракционная решетка, состоящая из диэлектрической пластины, расположенной над плоским металлическим зеркалом, параметры которой изменяются за счет создания газоразрядной закритической плазмы в пазах диэлектрика, позволяет в сантиметровом диапазоне длин волн эффективно коммутировать потоки СВЧ-излучения мегаваттного уровня за времена  $\sim 10$  нс. Дифракционная решетка такого типа, состоящая из кварцевой пластины и плоского металлического зеркала, может быть использована в качестве эффективного фазовращателя с регулируемой величиной сдвига фазы отраженной волны за счет изменения расстояния между пластиной и зеркалом.

2. Использование коммутатора, состоящего из пластины кремния, расположенной на поверхности плоского металлического зеркала, позволяет

эффективно управлять фазой СВЧ-излучения сантиметрового диапазона длин волн за счет создания в полупроводнике фотопроводящего слоя, возникающего при воздействии лазерного излучения с энергией кванта порядка ширины запрещенной зоны и плотностью излучения не менее  $0,25 \text{ мДж/см}^2$ .

3. Метод последовательного преобразования осесимметричных мод  $TE_{01}$ ,  $TE_{02}$  и  $TE_{03}$  позволяет создать компактный пассивный компрессор импульсов. Прибор содержит единственную линию задержки и не требует развязки с СВЧ-источником, что существенно повышает электрическую прочность по сравнению с существующим компрессором SLED-II, имеющим две линии задержки и развязку в виде одномодового 3-дБ направленного ответвителя.

4. В трехсантиметровом диапазоне длин волн на основе 3-дБ ответвителей, работающих на низшей моде волновода прямоугольного поперечного сечения, могут быть созданы высокоэффективные, дистанционно управляемые переключатели и фазовращатели СВЧ-излучения, пригодные для работы на мощностях до сотен мегаватт.

### Научная и практическая значимость

Исследованные в диссертационной работе компрессоры СВЧ-импульсов, их компоненты, включая коммутаторы СВЧ-излучения, представляются перспективными для применения в различных экспериментальных работах. Ожидается, что основные применения будут связаны с созданием нового поколения линейных электрон-позитронных коллайдеров, радиолокаторов с высокой разрешающей способностью, импульсной широкополосной спектроскопией на основе внешней модуляции излучения, а также с построением линий передачи мощного микроволнового излучения.

Компрессор СВЧ-импульсов на основе трехзеркального резонатора с активной дифракционной решеткой в качестве коммутатора использовался в экспериментах по сжатию импульсов магнотрона на частоте 34 ГГц в физической лаборатории Йельского университета.

Быстродействующий квазиоптический фазовращатель на основе индуцированной фотопроводимости в кремнии на частоту 30 ГГц был изготовлен совместно с ЗАО НПП «Гиком» по контракту с CERN.

Волноводный переключатель и фазовращатель СВЧ-излучения 12 ГГц частоты с дистанционным управлением применяется на высоком уровне мощности в стенде «Two beam Test-stand» в CERNe в экспериментах по тестированию компонентов будущего коллайдера CLIC.

Система ввода-вывода мощности на осесимметричной волне на частоте 30 ГГц использовалась в ОИЯИ на выходе мазера на свободных электронах (МСЭ) в экспериментах по изучению импульсного СВЧ-нагрева и деградации металлов.

### Публикации и апробация результатов

Материалы диссертации были опубликованы в работах [A1–A23], среди которых 9 статей в реферируемых журналах из списка ВАКа. Результаты работы докладывались автором или соавторами на семинарах ИПФ РАН, на научных конференциях по радиофизике ННГУ в 2004 и 2005 годах, на все-русском школе-семинаре МГУ «Физика и применение микроволн» в 2005, на российско-германских семинарах по гиротронам и нагреву плазмы, на международных конференциях по миллиметровым волнам: Strong Microwaves in Plasmas (SMIP) в 2005, International Conference on Infrared and Millimeter Waves и International Conference on Terahertz Electronics в 2007, Strong Microwaves Sources and Applications (SMSA) в 2008, на международных конференциях по ускорителям: Linear Accelerator Conference (LINAC) в 2004, European Particle Accelerator Conference (EPAC) в 2006, Particle Accelerator Conference (PAC) в 2007.

### Личный вклад автора

Все приведенные в диссертации теоретические исследования, численные расчеты и экспериментальные работы проведены либо автором лично, либо при его непосредственном участии. Большая часть численных расчетов, на основе которых изготавливались конкретные устройства, были выполнены автором лично. При разработке активной дифракционной решетки и основанного на ней компрессора СВЧ-импульсов [A6, A8, A13, A23], автор провел численное моделирование и принимал непосредственное участие в экспериментах по испытаниям коммутатора и компрессора на низком и на высоком уровнях мощности, а также выполнил обработку и анализ результатов численного моделирования и экспериментальных данных.

В работе, посвященной исследованию эффекта индуцированной фотопроводимости в кремнии при его облучении лазерным излучением, автором проведено численное моделирование эффекта. Автор принимал непосредственное участие в экспериментах по проверке эффекта на различных типах полупроводников, а также при испытании СВЧ-фазовращателя на низком уровне СВЧ-мощности на частоте 30 ГГц. Опубликованные работы [A1, A4, A20, A21] написаны в соавторстве с сотрудниками, принимавшими участие в выполнении исследований. Автор осуществлял численное моделирование коммутатора на основе резонатора, выводимого из резонанса электронным пучком [A5, A22].

В исследовании компактного компрессора СВЧ-импульсов на основе многомодовой линии задержки [A2, A10, A12, A14, A16, A18], автором были проведены как численное моделирование, так и экспериментальное исследование на низком уровне СВЧ-мощности. В задаче об увеличении эффективности активных компрессоров импульсов за счет использования

многомодовых резонаторов [А19] автором было выполнено математическое моделирование.

В разработках эффективных поворотов волноводной линии передачи на моде  $TE_{01}$  круглого сечения [А3, А7, А11, А15, А17], а также эффективных аттенюатора мощности и фазовращателя с использованием 3-дБ направленных ответвителей [А9], автором были проведены численное моделирование и экспериментальные исследования устройств на низком уровне мощности.

### Структура и объем диссертации

Диссертация состоит из введения, трех глав, заключения, списка цитированной литературы и списка публикаций автора по теме диссертации. Общий объем диссертации составляет 154 страницы, включая 156 рисунков, 6 таблиц и список литературы из 94 наименований.

### СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ

В первой главе рассматриваются квазиоптические коммутаторы, способные изменять фазу волны или направление распространения СВЧ-излучения. Такие коммутаторы нашли применение в созданных квазиоптических компрессорах СВЧ-импульсов как пассивного, так и активного типов, описанных в главе 2.

Во введении к первой главе обобщаются требования, предъявляемые к коммутаторам для их работы в составе компрессоров СВЧ-импульсов. Отмечено, что время переключения коммутаторов должно быть мало по сравнению с длительностью выходного импульса компрессора. Для работы на высоком уровне СВЧ-мощности коммутаторы должны иметь высокую электрическую прочность, которая может быть достигнута при их разработке с использованием методов квазиоптики. Также коммутаторы должны обладать высокой эффективностью, т.е. обеспечивать низкий уровень омических и дифракционных потерь.

В разделе 1.1 описываются результаты исследований электрически управляемой дифракционной решетки (Рис. 6), состоящей из диэлектрической пластины, расположенной над плоским металлическим зеркалом. Идея коммутатора в виде отражающей дифракционной решетки основана на разделении падающего волнового пучка на несколько вторичных пучков, различающихся интенсивностью и направлением распространения. В рассматриваемой решетке изменение ее параметров происходит за счет создания плазмы в газоразрядных каналах внутри диэлектрика. Изменение параметров решетки приводит к изменению отношения интенсивностей отражающихся от решетки пучков.



Рис. 6. Дифракционная решетка: 1 – металлическое зеркало, 2 – диэлектрическая пластина с периодическими пазами

Приводятся результаты расчетов методом FDTD нескольких дифракционных решеток с диэлектрическими пластинами из различных материалов: полистирола, кварца, кварца и тефлона. Показано, что при создании плазмы с концентрацией электронов в диапазоне от  $10^{13} \text{ см}^{-3}$  до  $10^{14} \text{ см}^{-3}$  доля мощности СВЧ-излучения на частоте 34 ГГц, ответвляемая решеткой в направлении дифракционного максимума, может изменяться от 8 до 70%. Параметры изготовленных решеток измерялись на экспериментальном стенде на низком уровне СВЧ-мощности. Проведено сравнение результатов экспериментов с расчетом.

В расчетах показана возможность использования дифракционной решетки, имеющей, например, кварцевую пластину, для переключения фазы СВЧ-излучения, отраженного в зеркальном направлении. Приводятся результаты экспериментов по испытаниям дифракционной решетки с кварцевой пластиной на частоте 34 ГГц. Показано, что при небольшом угле падения СВЧ-излучения на решетку, при электрическом векторе падающей волны параллельном каналам решетки ( $TE$ -поляризация) и при создании плазмы с концентрацией электронов, превышающей критическую концентрацию  $N_e > 10^{13} \text{ см}^{-3}$ , величина фазового сдвига, регулируемая расстоянием между кварцевой пластиной и металлическим зеркалом, может быть получена равной  $180^\circ$ .

Раздел 1.2 посвящен исследованию СВЧ-коммутатора, активный элемент которого представляет собой пластину полупроводника, размещенную на поверхности металлического зеркала (Рис. 7).

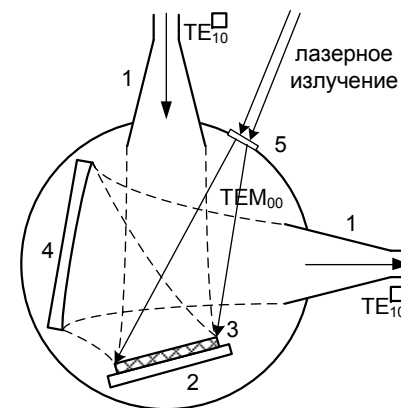


Рис. 7. Квазиоптический коммутатор фазы: 1 – рупор, 2 – плоское медное зеркало, 3 – кремниевый диск, 4 – фокусирующее медное зеркало, 5 – линза

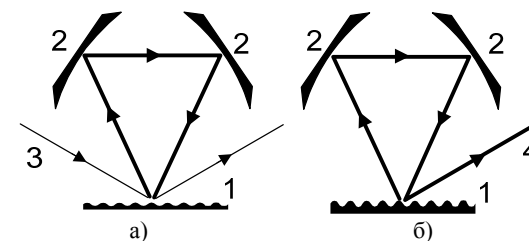
Переключение фазы электро-

магнитного излучения в волновом пучке достигается за счет создания в полупроводнике фотопроводящего слоя лазерным излучением с энергией кванта равной ширине запрещенной зоны в полупроводнике. В разделе описаны эксперименты на низком уровне мощности с коммутатором на основе индуцированной фотопроводимости в кремнии. Показано, что такой коммутатор может иметь малое время переключения ( $\sim 1$  нс), а высокая эффективность переключения излучения на частоте 30 ГГц обеспечивается уровнем энергии лазера не менее 5 мДж.

**В разделе 1.3** описывается фазоинвертор миллиметрового диапазона длин волн в виде волноводного резонатора, переключаемого пучком электронов. Активные коммутаторы СВЧ-излучения, описанные в предыдущем разделе, имеют ограниченную электрическую прочность даже при условии применения волновых пучков с большими в масштабе длины волны апертурами. Это ограничение связано, прежде всего, с возможностью возникновения мультипакторного пробоя на поверхности диэлектрика. Чтобы избежать проблем, связанных с этим видом пробоя, привлекательным является применение переключателей без использования диэлектрических материалов. В разделе приводятся результаты численного моделирования, а также результаты испытаний нескольких конструкций фазовращателя, перестраиваемого электронным пучком. На низком уровне мощности на частоте 34 ГГц продемонстрировано переключение фазы излучения на  $180^\circ$  за время, не превышающее 30 нс при инжекции электронного пучка с током равным  $I = 400 \div 500$  А.

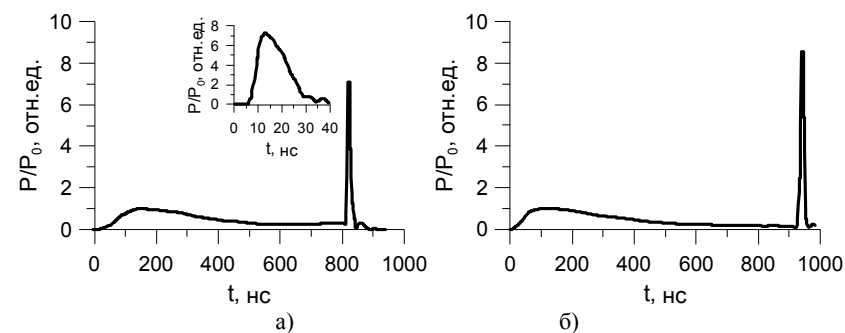
**Вторая глава** посвящена исследованиям систем компрессии СВЧ-импульсов, в которых нашли применение коммутаторы распределенного типа, рассмотренные в предыдущей главе.

**В разделе 2.1** описываются исследования активного компрессора миллиметрового диапазона длин волн на основе трехзеркального резонатора с бегущей волной. В этом резонаторе для связи с входным и выходным трактами и изменения добротности в качестве одного из зеркал использована электрически управляемая дифракционная решетка, параметры которой изменяются при создании плазмы в каналах решетки (Рис. 8). В первой главе был рассмотрен такой активный элемент – коммутатор в виде электрически управляемой дифракционной решетки. Здесь представлены результаты расчета и испытаний на низком уровне мощности активного компрессора, а также результаты экспериментов на высоком уровне мощности при компрессировании СВЧ-импульсов магнетрона, работающего на частоте 34,29 ГГц. С использованием вакуумного варианта активного компрессора получены сжатые импульсы мощностью 1,7 МВт при коэффициенте усиления по мощности равном 7 и длительностью 20 нс с эффективностью компрессии 25% (Рис. 9).



**Рис. 8.** Активный компрессор на основе трехзеркального резонатора: 1 – дифракционная решетка – коммутатор, 2 – фокусирующие зеркала, 3 – входной импульс, 4 – выходной импульс; а – резонатор в режиме накопления энергии, б – резонатор в режиме вывода сжатого импульса

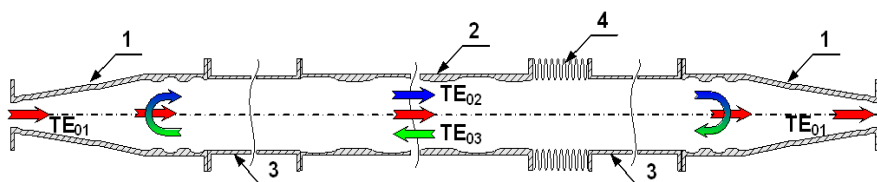
**Раздел 2.2** посвящен описанию конструкций и принципов работы пассивных компрессоров СВЧ-импульсов, в которых переключение фазы осуществляется различными фазоинверторами распределенного типа на основе: электрически управляемой дифракционной решетки с кварцевой пластиной; решетки с пластиной из кремния, работающей на эффекте индуцированной фотопроводимости; волноводного резонатора, переключаемого инжектируемым пучком электронов.



**Рис. 9.** Характерные осциллограммы сжатого импульса активного компрессора на основе трехзеркального резонатора

**В разделе 2.3** представлены результаты исследований компактного пассивного компрессора СВЧ-импульсов (с фазовой модуляцией входного импульса), аналогичного по своему предназначению широко известному компрессору SLED-II, однако, состоящего из единственной резонансной линии задержки (Рис. 10). В таком резонаторе накопление СВЧ-энергии осуществляется путем последовательного преобразования осесимметричных мод  $TE_{01}$ ,  $TE_{02}$  и  $TE_{03}$  круглого волновода, а ввод и вывод энергии – на первой моде  $TE_{01}$ . Приводятся результаты эксперимента, в котором продемонстрирована работа компрессора на низком уровне мощности на частоте 30 ГГц.

На этой частоте были получены коэффициент усиления по мощности – 4,5 и эффективность компрессии – 67%, близкие к расчетным параметрам.

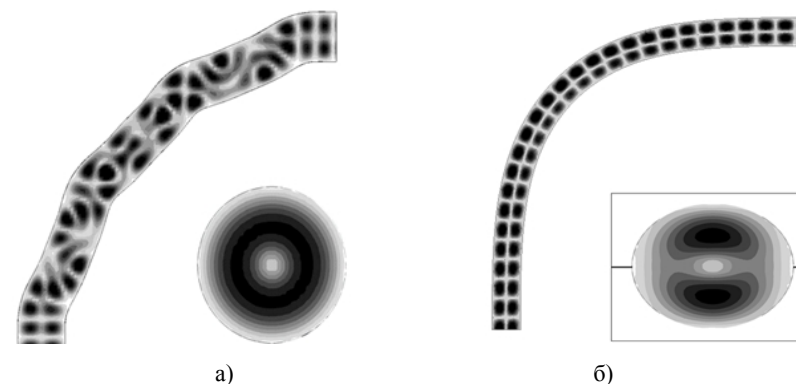


**Рис. 10.** Одноканальный пассивный компрессор СВЧ-импульсов SLED-II: 1 –  $TE_{02} \leftrightarrow TE_{03}$  отражательный преобразователь мод; 2 –  $TE_{01} \rightarrow TE_{02}$  преобразователь мод на прохождение; 3 – линии задержки, 4 – сифон для настройки частоты

Важным параметром компрессоров СВЧ-импульсов является эффективность компрессии (отношение энергии, полученной в сжатом импульсе, к энергии во входном импульсе). Предельно достижимая эффективность ограничена как из-за внутренних потерь в накопительном резонаторе, так и из-за дифракционных потерь, возникающих из-за отражения части мощности входного импульса от элемента связи с резонатором. Поэтому в целях повышения эффективности компрессии в разделе 2.4 анализируется возможность уменьшения потерь на отражение путем возбуждения в резонаторе нескольких мод с близкими частотами. На основании результатов анализа предлагается модификация рассмотренных ранее систем компрессии для работы накопительных резонаторов на комбинации собственных колебаний для увеличения эффективности ввода энергии.

**Третья глава** посвящена исследованиям СВЧ-компонентов, необходимых для построения компрессоров, их элементов связи, линий передач излучения, устройств согласования структур полей, импульсных СВЧ-нагрузок.

В разделе 3.1 исследуются повороты волновода круглого сечения с распространяющейся в нем  $TE_{01}$  модой. Для снятия вырождения мод  $TE_{01}$  и  $TM_{11}$ , мешающих сохранению исходной моды при изгибе волновода, предложены два новых варианта поворотов. Первый вариант – поворот с неизменным круглым сечением и переменной кривизной, профиль которой синтезируется для снятия вырождения (Рис. 11а). Второй вариант – поворот с использованием перехода с круглого на эллиптическое сечение волновода, где вырождение снято, и с профилем кривизны, оптимизированным с помощью теории чебышевских переходов (Рис. 11б). Такие 90-градусные повороты, как показали проведенные эксперименты, обеспечивают высокую эффективность передачи излучения на моде  $TE_{01}$  волновода круглого сечения.



**Рис. 11.** Мгновенное распределение электрического поля в продольном и поперечном сечении волноводного поворота: (а) – поворот с круглым поперечным сечением и, (б) – поворот с эллиптическим сечением

В разделе 3.2 описываются теоретические и экспериментальные исследования дистанционно управляемых волноводных переключателей и фазовращателей. Оба устройства основаны на применении компактных трехдецибельных направленных ответвителей. В двух плечах одного из ответвителей расположены: переходы с прямоугольного сечения на круглое, преобразователи моды  $TE_{11}$  в  $TE_{01}$  круглого волновода и закритические поршни-отражатели. Переключение устройств обеспечивается за счет механического перемещения поршней. Волноводный переключатель может использоваться для варьирования выходной мощности, а фазовращатель – для изменения фазы на выходе.

Для диагностики проходящей мощности, для развязки микроволнового излучения и электронного пучка предлагается использовать устройства ввода-вывода излучения на осесимметричной моде  $TE_{01}$ . Различные устройства такого типа рассмотрены в разделе 3.3.

При построении линий передач часто необходимы согласованные нагрузки, поглощающие СВЧ-излучение. В разделе 3.4 рассмотрены распределенные, компактные нагрузки волноводного типа, обеспечивающие низкий уровень отражения.

## ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ДИССЕРТАЦИОННОЙ РАБОТЫ

1. Для коммутации потоков СВЧ-излучения разработана электрически управляемая дифракционная решетка, состоящая из соединенных вместе кварцевой и тефлоновой пластин, размещенных над плоским металлическим зеркалом и имеющих периодические пазы внутри одной из них. За счет создания в пазах газоразрядной плазмы достигается переключение волновых потоков в направлении из зеркального в дифракционный максимум. Показано, что на частоте 34 ГГц эффективное переключение решетки с размерами  $240 \times 120$  мм на величину до 60% мощности за время не более 10 нс обеспечивается плазмой с концентрацией электронов в диапазоне от  $10^{13} \text{ см}^{-3}$  до  $10^{14} \text{ см}^{-3}$  при использовании импульсов напряжения 50–100 кВ и при давлении газа в пазах 0,3–1 Торр.

2. Разработан активный компрессор СВЧ-импульсов на основе трехзеркального накопительного резонатора, в котором одним из зеркал является дифракционная решетка, способная управлять связью резонатора с запитывающим волновым пучком. В экспериментах на частоте 34 ГГц получены сжатые импульсы мощностью 1,7 МВт при коэффициенте усиления равным 7 и длительностью 20 нс с эффективностью 25%. Показано, что предельная мощность сжатых импульсов в созданном компрессоре составляет не более 50 МВт при длительности импульса 20 нс и ограничивается самопробоем газа в каналах дифракционной решетки.

3. Для быстрого управления фазой СВЧ-излучения сантиметрового диапазона длин волн разработаны электрически управляемые компоненты:

– дифракционная решетка, состоящая из кварцевой пластины, расположенной над плоским металлическим зеркалом, переключаемая путем создания плазмы в каналах пластины. Экспериментально показано, что при создании плазмы в каналах решетки с концентрацией электронов, превышающей критическую концентрацию, величина фазового сдвига регулируется расстоянием между пластиной и зеркалом и может быть получена равной  $180^\circ$  при времени переключения решетки с размерами  $240 \times 120$  мм, не превышающем 10 нс;

– активное зеркало, состоящее из пластины кремния, находящейся на металлической поверхности, действие которого основано на эффекте индуцированной фотопроводимости в полупроводнике. На низком уровне мощности экспериментально показано эффективное переключение фазы СВЧ-излучения на  $180^\circ$  за время, не превышающее 10 нс, при помощи лазерных импульсов на длине волны 0,5–1 мкм с энергией 5–10 мДж;

– волноводный резонатор на осесимметричной моде  $TE_{011}$ , действие которого основано на изменении фазы отраженной волны при выводе его из резонанса с помощью электронного пучка. На низком уровне мощности продемонстрировано переключение фазы излучения на  $180^\circ$  за время, не превышающее 30 нс, при инжекции пучка электронов с током  $400 \div 500$  А.

4. Разработан электропрочный пассивный компрессор СВЧ-импульсов, состоящий из единственной резонансной линии задержки, работающей на комбинации осесимметричных мод  $TE_{01}$ ,  $TE_{02}$  и  $TE_{03}$ . В отличие от существующего двухканального компрессора SLED-II в нем исключена необходимость в развязке на основе одномодовых волноводов. На частоте 30 ГГц продемонстрирована работа компрессора на низком уровне мощности, получены коэффициент усиления по мощности, равный 4,5, и эффективность компрессии 67%.

5. Проанализированы два метода создания высокоэффективных поворотов на моде  $TE_{01}$  волновода круглого поперечного сечения, основанные на снятии вырождения мод  $TE_{01}$  и  $TM_{11}$ : а) посредством введения небольшой эллиптичности поперечного сечения волновода; б) посредством введения высших гармоник в профиль изгиба. На основе обоих методов рассчитаны и экспериментально проверены два 90-градусных поворота на частоту 34 ГГц, эффективность которых составила 98% в полосе частот 1,3% и 95% в полосе частот 10%, соответственно.

6. Разработаны дистанционно управляемые высокоэффективные переключатель и фазовращатель мощного СВЧ-излучения частотой 12 ГГц на основе 3-дБ ответвителей. Переключатель способен обеспечить плавное управление мощностью в выходных каналах от 0 до 95%. Фазовращатель осуществляет перестройку фазы в пределах от  $0^\circ$  до  $410^\circ$ . Устройства использовались в CERN в экспериментах, демонстрирующих работу ускоряющей структуры будущего электрон-позитронного коллайдера CLIC, на мощности до 180 МВт и длительности импульса 200 нс.

## СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

- A1. *Вихарев А.А., Денисов Г.Г., Кочаровский В.В., Кузиков С.В., Паршин В.В., Песков Н.Ю., Степанов А.Н., Соболев Д.И., Шмелев М.Ю.*, Быстродействующий квазиоптический переключатель фазы волнового пучка, основанный на эффекте индуцированной фотопроводимости в кремнии // Письма в ЖТФ, 2007, том 33, вып. 17, с. 38–45.
- A2. *Kuzikov S.V., Vikharev A.A., Plotkin M.E., Shegol'kov D.Yu. and Hirshfield J.L.*, One-channel Ka-band pulse compressor // Phys. Rev. ST Accel. Beams 10, 2007, 082001, 8 pages.
- A3. *Вихарев А.А., Денисов Г.Г., Кузиков С.В., Соболев Д.И.*, Волноводные повороты для эффективной передачи моды  $TE_{01}$  круглого волновода // Вестник НГУ, Серия: Физика, 2007, том 2, вып. 2, с. 74–81.
- A4. *Вихарев А.А., Денисов Г.Г., Кочаровский В.В., Кузиков С.В., Паршин В.В., Песков Н.Ю., Степанов А.Н., Соболев Д.И., Шмелев М.Ю.*, Быстродействующий квазиоптический фазовращатель, основанный на эффекте индуцированной фотопроводимости в кремнии // Известия вузов. Радиофизика, 2007, т. 50, № 10–11, с. 866–874.
- A5. *Вихарев А.Л., Вихарев А.А., Горбачев А.М., Иванов О.А., Исаев В.А., Кузиков С.В., Лобаев М.А.* Резонансный фазоинвертор миллиметрового диапазона длин волн, переключаемый пучком электронов // ЖТФ, 2009, т. 79, вып. 11, с. 86–92.
- A6. *Вихарев А.Л., Вихарев А.А., Горбачев А.М., Иванов О.А., Исаев В.А., Кузиков С.В.* Квазиоптический фазовращатель 8-мм диапазона на основе активной дифракционной решетки // Письма в ЖТФ, 2009, том 35, вып. 9, с. 67–75.
- A7. *Vikharev A.A., Denisov G.G., Kuzikov S.V. and Sobolev D.I.* New  $TE_{01}$  Waveguide Bends // Journal of Infrared, Millimeter and Terahertz Waves, 2009, vol. 30, no. 6, p. 556–565.
- A8. *Ivanov O.A., Vikharev A.A., Gorbachev A.M., Isaev V.A., Lobaev M.A., Vikharev A.L., Kuzikov S.V., Hirshfield J.L. and LaPointe M.A.* Active quasi-optical Ka-band RF pulse compressor switched by a diffraction grating // Phys. Rev. ST Accel. Beams 12, (2009), 093501, p. 9.
- A9. *Вихарев А.А., Кузиков С.В.* Дистанционно управляемые, волноводные переключатели и фазовращатели для тестирования ускоряющих структур на высоком уровне мощности // Вестник НГУ. Серия: Физика, 2011, т. 6, вып. 1, с. 36–43.
- A10. *Kuzikov S.V., Danilov Yu.Yu., Denisov G.G., Shegol'kov D.Yu., Vikharev A.A.* Multi-Mode SLED-II Pulse Compressors // Proceedings of 22-nd Int. Linear Accelerator Conference, Lubeck, Germany, 2004, August 16–20, p. 660–662.
- A11. *Вихарев А.А., Денисов Г.Г., Кузиков С.В., Соболев Д.И.* Повороты волновода круглого сечения для эффективной передачи моды  $TE_{01}$  // Тру-

ды XI Научной конференции по радиофизике / Н. Новгород: ННГУ, 2005, с. 36–37.

- A12. *Вихарев А.А., Кузиков С.В.* Компактный компрессор СВЧ импульсов на основе многомодовой линии задержки // Труды VIII Научной конференции по радиофизике Н. Новгород: ННГУ, 2004, с. 14–15.
- A13. *Gorbachev A.M., Kuzikov S.V., Vikharev A.A.* Electrically Controlled Diffraction Grating For Active Microwave Pulse Compressors // Strong Microwaves in Plasmas: Proceedings of 6th International Workshop “Strong Microwaves in Plasmas”, Nizhny Novgorod, Russia, 2005 / Ed. A.G. Litvak. N. Novgorod: IAP RAS, 2006, v. 1, p. 256–260.
- A14. *Kuzikov S.V., Danilov Yu.Yu., Denisov G.G., Hirshfield J.L., Koshurinov Yu.I., Paveliev V.G., Petelin M.I., Plotkin M.E., Shegol'kov D.Yu., Syratchev I., Vikharev A.A., Yashunin S.A.* Novel Quasi-Optical Passive Pulse Compressors // Strong Microwaves in Plasmas: Proceedings of 6th International Workshop “Strong Microwaves in Plasmas”, Nizhny Novgorod, Russia, 2005 / Ed. A.G. Litvak. N. Novgorod: IAP RAS, 2006, v. 1, p. 330–336.
- A15. *Вихарев А.А., Денисов Г.Г., Кузиков С.В., Соболев Д.И.* Эффективные повороты на моде  $TE_{01}$  круглого волновода // Труды X Всероссийского школы-семинара “Физика и применение микроволн“, Звенигород, Московская обл., 23–28 мая 2005 (на CD).
- A16. *Kuzikov S.V., Plotkin M.E., Vikharev A.A. and Hirshfield J.L.*, Compact one channel Ka-band SLED-II pulse compressor // Proceedings of EPAC. Edinburgh, Scotland, 2006, p. 1411–1413.
- A17. *Denisov G.G., Kuzikov S.V., Sobolev D.I., Vikharev A.A.*, New  $TE_{01}$  Waveguide Bends // Conference Digest of the Joint 31st International Conference on Infrared and Millimeter Waves and 14th International Conference on Terahertz Electronics. Shanghai, China, 2006, p. 45.
- A18. *Kuzikov S.V., Vikharev A.A., Plotkin M.E., Shegol'kov D.Yu., Hirshfield J.L., Yakovlev V.P.* One-channel, multi-mode active pulse compressor // Proceedings of PAC07, Albuquerque, New Mexico, USA, 2007, p. 2460–2462.
- A19. *Kuzikov S.V., Danilov Yu.Yu., Vikharev A.A.* Efficiency enhancement of active microwave pulse compressors // Conference Digest of the Joint 32nd IRMMW Conference and 15th International Conference on Terahertz Electronics. Cardiff, UK, 3 – 7 September 2007, vol. 1, p. 444–445.
- A20. *Denisov G.G., Kocharovskiy V.I., Kuzikov S.V., Parshin V.V., Peskov N.Yu., Stepanov A.N., Sobolev D.I., Shmelyov M.Yu., Syratchev I., Vikharev A.A.* Fast quasi-optical phase shifter based on induced photoconductivity in silicon // Conference Digest of the Joint 32nd IRMMW Conference and 15th International Conference on Terahertz Electronics, Cardiff, UK, 3 – 7 September 2007, vol. 1, p. 795–796.
- A21. *Denisov G.G., Kulygin M.L., Kuzikov S.V., Vikharev A.A.* Fast Optically Controlled Microwave Switches // VII Int. Workshop Strong Microwaves:

sources and applications, Nizhny Novgorod, July 27–August 2 2008, p. 184–188.

A22. *Вихарев А.Л., Вихарев А. А., Горбачев А.М., Иванов О.А., Исаев В.А., Кузиков С.В., Лобаев М.А.* Резонансный фазоинвертор миллиметрового диапазона длин волн, переключаемый пучком электронов : препринт №733 ИПФ РАН. Нижний Новгород, 2007, 16 с.

A23. *Вихарев А.А., Горбачев А.М., Кузиков С.В.* Дифракционная решетка – активный коммутатор для квазиоптического компрессора СВЧ-импульсов : препринт №738 ИПФ РАН. Нижний Новгород, 2007, 16 с.

## Литература

- [1] *Аликаев В.В., Денисов Г.Г., Запезалов В.Е., Курбатов В.И., Литвак А.Г., Мясников В.Е., Тай Е.М.* Гиротроны для УТС // Вакуумная СВЧ-электроника : сборник обзоров под ред. М.И. Петелина. Н.Новгород: ИПФ РАН, 2002, с.71.
- [2] *Балакин В.Е., Казаков С.Ю., Лунин А.Е., Чаишурин В.И.* Мощные микроволновые компоненты электрон-позитронных супер-коллайдеров // Вакуумная СВЧ-электроника : сборник обзоров под ред. М.И. Петелина. Н.Новгород: ИПФ РАН, 2002, с.13.
- [3] *Батенин В.М., Климовский И.И., Лысов Г.В., Троицкий В.Н.* СВЧ-генераторы плазмы. М.: Энергоатомиздат, 1988.
- [4] *Petelin M.I.* Microwave pulse compressors // Proc. of the 3<sup>rd</sup> International Workshop “Strong Microwave in Plasmas”, Nizhny Novgorod: IAP, 1996, т. 2, с. 903.
- [5] *Самсонов С.В.* Гирорезонансные приборы и СВЧ компрессоры на основе волноводов с винтовой гофрировкой поверхности // Диссертация ... док. физ.- мат. наук. Нижний Новгород, 2007, с. 197.
- [6] *Братман В.Л., Денисов Г.Г., Колганов Н.Г., Мишакин С.В., Самсонов С.В., Соболев Д.И.* Микроволновый источник мультигигаваттной пиковой мощности на основе комбинации релятивистской лампы обратной волны и компрессора // ЖТФ, 2011, т. 81, вып. 2, с. 113–117.
- [7] *Farkas Z. D., Hogg H.A., Loew G.A., Wilson P.B.* // Proc. 9<sup>th</sup> Int. Conf. on High Energy Accelerators, 1976, с. 576.
- [8] *Wilson P.B., Farkas Z.D., Ruth R.D., SLED-II: A new method of rf pulse compression* // Proc. of Linear Accl. Conf., Albuquerque, NM, SLAC-PUB-5330 (1990).
- [9] *Hogg H.A., Loew G.A., Price V.G.* Experiments with Very High Power RF Pulses at SLAC // IEEE Transactions on Nuclear Science, 1975, vol. NS-30, no. 4, p. 1299.
- [10] *Балакин В.Е., Сырачев И.В.* Применение открытых резонаторов в системах умножения СВЧ-мощности // XV совещание по ускорителям заряженных частиц. Протвино, 1996, том. 1, с. 92–96.

[11] *Syratchev I.* Barrel-Cavity Pulse compression system, (March 2001), <http://ctf3.home.cern.ch/ctf3/M33/is33.pdf>

[12] *Сырачев И.В.*, Новая система импульсной компрессии СВЧ- мощности для линейного коллайдера ВЛЭПП // Диссертация ... канд. физ.-мат. наук. Протвино, 1997, с. 103.

[13] *Tantawi S.G., Nantista C.D., Dolgashev V.A., Pearson C., Nelson J., Jobe K., Chan J., Fant K., Frisch J., Atkinson D.* High-power multimode X-band rf pulse compression system for future linear colliders // Phys. Rev. ST AB, 2005, 8, 042002.

[14] *Диденко А.Н., Юшков Ю.Г.*, Мощные СВЧ импульсы наносекундной длительности // М.: Энергоатомиздат, 1984.

[15] *Petelin M.I., Hirshfield J.L., Kuzikov S.V., Vikharev A.L.* High power microwave pulse compressors: passive, active and combined // Proceedings of SPIE, 2000, vol. 4031, p. 224–231.

[16] *Birx D.L., Scalapino D.J.* Microwave energy compression using high-intensity electron beam switch // J. Appl. Phys. 1980, т. 51, № 7, с. 3629.

[17] *Alvarez R.A., Birx D.L., Byrne D., Lauer E., Scalapino D.* // Particle Accelerators, 1981, т. 11, с. 125.

[18] *Девятков Н.Д., Диденко А.Н., Замятина Л.Ю., Разин С.Ю., Юшков Ю.Г.* Формирование мощных импульсов при накоплении СВЧ энергии в резонаторе // Радиотехника и электроника, 1980, т. 25, № 6, с. 1227.

[19] *Августинович В.А., Новиков С.А., Разин С.В., Юшков Ю.Г.* Формирование мощных импульсов наносекундной длительности трехсантиметрового диапазона // Изв. вузов. Радиофизика, 1985, т. 28, № 10, с. 1347.

[20] *Артеменко С.Н., Августинович В.А., Каминский В.Л., Чумерин П.Ю., Юшков Ю.Г.* Анализ процесса формирования радиоимпульсов в сверхразмерном резонаторе с интерференционным ключом // Радиотехника и электроника, 1997, т.42, № 8, с. 1011.

[21] *Чумерин П.Ю., Юшков Ю.Г.* Формирователь гигаваттных наносекундных СВЧ импульсов с применением временной компрессии энергии излучения магнетрона // Приборы и техника эксперимента, 2000, № 3, с. 85.

[22] *Yushkov Y.G., Avgustinovich V.A., Artemenko S.N., Kaminsky V.L., Novikov S.A., Razin S.V., Chumerin P.Y.* Powerful microwave compressors of rf-pulses // Proceedings of the 3th International Workshop “Strong microwaves in plasmas” / Ed. A.G. Litvak. Nizhny Novgorod, Russia, 1997, т. 2, с. 911.

[23] *Артеменко С.Н., Августинович В.А., Чумерин П.Ю., Юшков Ю.Г.* Вывод энергии из сверхразмерного резонатора через “пакет” интерференционных переключателей с суммированием выходных сигналов // ЖТФ, 2000, т. 70, в. 11, с. 105.

[24] *Nantista C.D.,* Radio-Frequency Pulse Compression for Linear Accelerators // SLAC-Report-95-455, 1995.

- [25] *Вихарев А.Л., Горбачев А.М., Иванов О.А., Исаев В.А., Кузиков С.В., Колыско А.Л., Петелин М.И.* Активный компрессор СВЧ импульсов на осесимметричной моде круглого волновода // Письма в ЖТФ, 1998, т. 24, № 20, с. 6.
- [26] *Вихарев А.Л., Горбачев А.М., Иванов О.А., Исаев В.А., Кузиков С.В., Хиришфилд Дж.Л., Нежевенко О.А., Голд С.Х., Кинкид А.Л.* Исследование активных СВЧ компрессоров, возбуждаемых излучением магнicona на частоте 11,4 ГГц // Изв. вузов. Радиофизика, 2003, т. 46, № 8–9, с. 897.
- [27] *Вихарев А.Л., Горбачев А.М., Иванов О.А., Исаев В.А., Кузиков С.В., Мовшевич Б.З., Хиришфилд Дж.Л., Голд С.Х.* Активный брэгговский компрессор трехсантиметрового диапазона длин волн // Изв. вузов. Радиофизика, 2008, т. 51, № 7, с. 6.
- [28] *Вихарев А.Л., Горбачев А.М., Иванов О.А., Исаев В.А., Колданов В.А., Кузиков С.В., Хиришфилд Дж.Л., Голд С.Х.* Двухканальный 100-мегаваттный СВЧ компрессор трехсантиметрового диапазона длин волн // Изв. вузов. Радиофизика, 2008, т. 51, № 8, с. 660–674.
- [29] *Bratman V.L., Denisov G.G., Ginzburg N.S. et al.* // IEEE Journal of Quantum Electronics, 1983, т. QE-19, № 3, с. 282.
- [30] *Денисов Г.Г., Резников М.Г.* Гофрированные цилиндрические резонаторы для коротковолновых релятивистских СВЧ генераторов // Изв. вузов. Радиофизика, 1982, т. 25, № 5, с. 562.
- [31] *Лобаев М.А.* Исследование разрядных явлений в плазменных коммутаторах СВЧ излучения большой мощности : Диссертация ... канд. физ.-мат. наук. Нижний Новгород, 2010, с. 136.
- [32] *Nezhevenko O.A., Yakovlev V.P., Ganguly A.K., Hirshfield J.L.* High power pulsed magnicon at 34 GHz // AIP Conf. Proc., 474 (American Institute of Physics, Melville), 1999, p.195.
- [33] *Nezhevenko O.A.*, Recent developments in high power magnicons for particle accelerators // Plasmas Physics (2000) v.7, №5, p.2224.
- [34] *Denisov G.G., Kuzikov S.V., Bogdashev A.A., Chirkov A.V., Hirshfield J.L., Litvak A.G., Malygin V.I., Shmelyov M.Yu.* Study of Ka-band components for future high-gradient accelerators // Advanced Accelerator Concepts, 10th Workshop / C.E.Clayton and P.Muggli, eds, AIP Conf. Proc., 2002, v. 647, p. 476–483.
- [35] *Каценеленбаум Б.З.* Высокочастотная электродинамика // М.: Наука, 1966. 237 с.
- [36] *Вайнштейн Л.А.*, Открытые резонаторы и открытые волноводы // М.: Сов. радио, 1966. 475 с.
- [37] *Fox A.G., Li T.* // Bell System Techn J., 1961, vol. 40, no. 2, p. 453–464.
- [38] *Таланов В.И.* Резонаторы квантовых генераторов оптического диапазона // Файн В.М., Ханин Я.И. Квантовая радиофизика. М.: Сов. радио, 1965, с. 508–541.
- [39] *Бондаренко Н.Г., Таланов В.И.* Некоторые вопросы теории квазиоптических систем // Изв. вузов. Радиофизика, 1964, т. 7, № 2. с. 313–327.
- [40] *Данилов Ю.Ю., Кузиков С.В., Петелин М.И.* К теории компрессора микроволновых импульсов на основе бочкообразного резонатора с винтовым гофром // ЖТФ, 2000, т.70, вып. 1, с.65.
- [41] *Данилов Ю.Ю., Кузиков С.В., Павельев В.Г., Кошуринов Ю.И., Лецинский С.М.* Компрессия микроволновых импульсов квазиоптическим резонатором с гофрированным зеркалом // Письма в ЖТФ, 2001 т. 27, вып. 19, с.5.
- [42] *Данилов Ю.Ю., Кузиков С.В., Павельев В.Г., Кошуринов Ю.И., Щегольков Д.Ю.* Компрессия линейно-модулированных по частоте импульсов на основе кольцевого трехзеркального резонатора // ЖТФ, 2005, т. 75, вып. 4, с. 131.
- [43] *Данилов Ю.Ю.* Пассивные резонансные компрессоры микроволновых импульсов // Диссертация ... канд. физ.-мат. наук. Нижний Новгород, 2003, с. 143.
- [44] *Vikharev A.L., Danilov Yu.Yu., Gorbachev A.M., Kuzikov S.V., Koshurinov Yu.I., Paveliev V.G., Petelin M.I., Hirshfield J.L.* Quasi-optical microwave pulse compressor at 34 GHz // Advanced Accelerator Concepts, 10th Workshop / Eds. C.E. Clayton and P. Muggli. AIP Conf. Proc., 2002, v. 647, p. 448–458.
- [45] *Вихарев А.Л., Ковалев Н.Ф., Петелин М.И.* Распределенные переключатели волновых пучков и компрессоры микроволновых импульсов // Письма в ЖТФ, 1996, т. 22, вып. 19, с. 41–46.
- [46] *Вихарев А.Л., Горбачев А.М., Иванов О.А., Ковалев Н.Ф., Колыско А.Л., Кузиков С.В., Фильченков С.Е.* Генерация импульсов мощного когерентного электромагнитного излучения путем компрессии // Сборник отчетов по научным проектам МНТП России «Физика микроволн» за 1995 год, Нижний Новгород, 1996, т. 1, с. 61–64.
- [47] *Кузиков С.В.* Диссертация ... кандидата физ.-мат. наук / ИПФ РАН, Нижний Новгород, 1998.

Вихарев Александр Анатольевич

**КВАЗИОПТИЧЕСКИЕ КОМПРЕССОРЫ  
МОЩНЫХ МИКРОВОЛНОВЫХ ИМПУЛЬСОВ**

Автореферат

Ответственный за выпуск

*А. А. Вихарев*

Подписано к печати 10.05.11.

Формат 60 × 90 <sup>1</sup>/<sub>16</sub>. Бумага офсетная.

Усл. печ. л. 1,75. Тираж 100 экз. Заказ № 45(2011).

Отпечатано в типографии Института прикладной физики РАН,  
603950 Н. Новгород, ул. Ульянова, 46