

УДК 621.372.8

А. А. Вихарев, С. В. Кузиков

Институт прикладной физики РАН
ул. Ульянова, 46, Нижний Новгород, 603950, Россия
E-mail: alvikharev@yandex.ru

ДИСТАНЦИОННО УПРАВЛЯЕМЫЕ ВОЛНОВОДНЫЕ ПЕРЕКЛЮЧАТЕЛИ И ФАЗОВРАЩАТЕЛИ ДЛЯ ТЕСТИРОВАНИЯ УСКОРЯЮЩИХ СТРУКТУР НА ВЫСОКОМ УРОВНЕ МОЩНОСТИ

В статье рассматриваются переключатель и фазовращатель на частоту 12 ГГц, перестраиваемые с помощью электрических шаговых двигателей. Оба устройства выполнены на основе волновода WR90 прямоугольного сечения и предназначены для работы при мощности ~100 МВт и длительности импульса до 10^3 нс.

Ключевые слова: волноводный переключатель, фазовращатель, ускоряющая структура.

Введение

Проектируемый в настоящее время в CERN (European Organization for Nuclear Research) электрон-позитронный коллайдер CLIC (CERN Linear Collider) тераэлектрон-вольтного уровня энергий сталкивающихся частиц представляет собой сложнейший многокилометровый прибор, состоящий из огромного числа элементов [1]. Среди них микроволновые компоненты на рабочую частоту 12 ГГц, такие как ускоряющие секции основного ускоряемого пучка и секции так называемого «драйв»-пучка, составляют наибольшую долю. Поскольку успешная реализация коллайдера CLIC зависит от надежной работы всех секций, необходимо иметь возможность тестирования ускоряющих структур на высоком уровне микроволновой мощности, моделирующем их работу в составе коллайдера, в котором проектируемый темп ускорения составляет ~100 МВ/м. Поля на стенках структур оказываются еще примерно вдвое выше, поэтому тестирование необходимо прежде всего с точки зрения оптимизации и проверки электропрочности структур по отношению к пристеночному микроволновому пробую.

Тестирование компонент предполагает возможность варьирования подаваемой на них микроволновой мощности в широких пределах (от нуля до сотен мегаватт), в ча-

стности для так называемой тренировки поверхности. В процессе тренировки от импульса к импульсу микроволновую мощность необходимо постепенно повышать. Такое управление проще всего реализовать при помощи отдельного, мощного усилителя излучения, например мультимегаваттного клистрона [2]. Однако максимально достижимая мощность в клистроне ограничена, а его оптимальный режим работы не позволяет в полной мере изменять выходную мощность во всем требуемом диапазоне. Поэтому возникает необходимость в использовании внешней по отношению к такому источнику электродинамики, т. е. переключателей, управляющих ответвлением. Если же источником излучения является не усилитель, а генератор, то тем более ввиду жестких режимов самовозбуждения возможность полноценного варьирования микроволновой мощности может состоять лишь в применении управляемого переключателя. Для тестирования компонентов CLIC предполагается использовать обе перечисленные возможности. Для реализации второй из них планируется применять драйв-пучок STF3 (CLIC Test Facility 3) [3]. С использованием драйв-пучка, варьирование тока которого затруднительно, схема тестирования может выглядеть, как показано на рис. 1. Иначе говоря, лишь часть мощности с выхода секции драйв-пучка, где генерируется микро-

волновая мощность, подается обратно на вход этой секции, а часть ответвляется в тестируемую ускоряющую структуру (или иной тестируемый компонент). Для реализации этой схемы рециркуляции [4], позволяющей контролировать долю энергии, отдаваемую драйв-пучком, и долю мощности, поступающую к тестируемой структуре, принципиально необходимы управляемые переключатель и фазовращатель с возможностью плавной перестройки ответвления и вносимой фазы. Расчет, дизайн и проверка этих двух устройств на низком уровне мощности рассмотрены далее.

Принцип действия и устройство дистанционно управляемых переключателей и фазовращателей

В дизайне обоих устройств применен так называемый 3 дБ направленный ответвитель, широко используемый для развязки источников микроволнового излучения от несогласованных нагрузок в трактах большой мощности [5]. В таком ответвителе поток излучения из порта 1 делится на два равных потока в портах 3 и 4, отличающихся фазой на $\pi/2$ (рис. 2, а). При условии идентичности отражений в портах 3 и 4 вся отраженная мощность попадает в порт 2 и не проникает обратно в порт 1 (рис. 2, б).

Для построения фазовращателя достаточно одного 3 дБ ответвителя (рис. 3, а). Излучение на моде TE_{10} прямоугольного волновода делится ответвителем поровну между двумя каналами. Каждый из каналов имеет на конце идентичные, полностью отражающие подвижные поршни, соединенные между собой для обеспечения синхронности перемещения. Поршни приводятся в движение при помощи шаговых, электрически управляемых моторов. Специфика большой мощности проявляется в том, что поршни в этой схеме работают на осесимметричной моде TE_{01} для предотвращения пробоя на щелях, неизбежно возникающих между поршнями и стенками волновода, в котором производится перемещение. Для осуществления этой идеи в каждом канале имеются преобразователи моды TE_{10} волновода прямоугольного поперечного сечения в моду TE_{01} волновода круглого сечения [6]. Поршни выполнены в виде закрывающих для рабочей моды TE_{01} отрезков волновода, внутрь которых помещен поглотитель в ви-

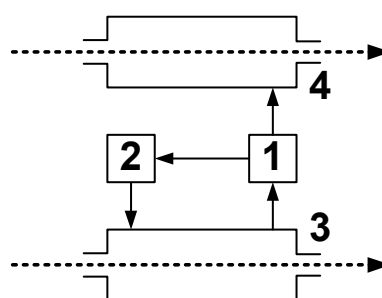


Рис. 1. Схема использования дистанционно управляемых переключателя и фазовращателя: в составе стенда «two beam test stand» для тестирования ускоряющих секций: 1 – переключатель; 2 – фазовращатель; 3 – замедляющая структура драйв-пучка; 4 – тестируемая ускоряющая структура (или иной тестируемый компонент)

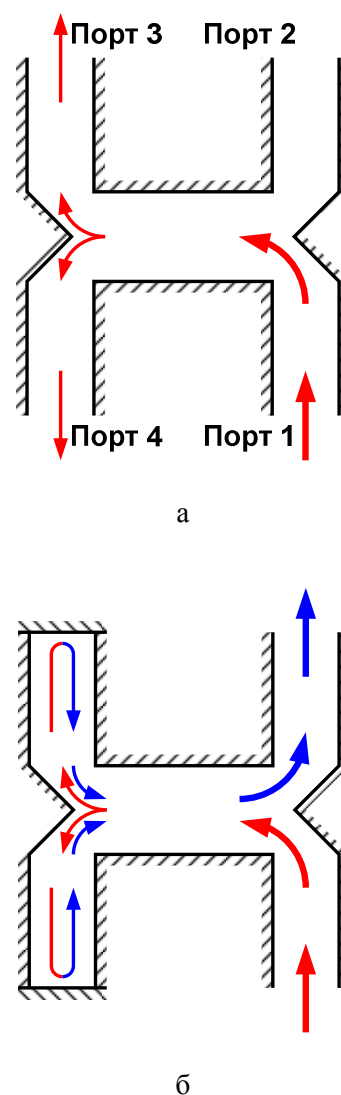


Рис. 2. Схема работы 3 дБ ответвителя (а) и схема его использования в качестве СВЧ развязки (б)

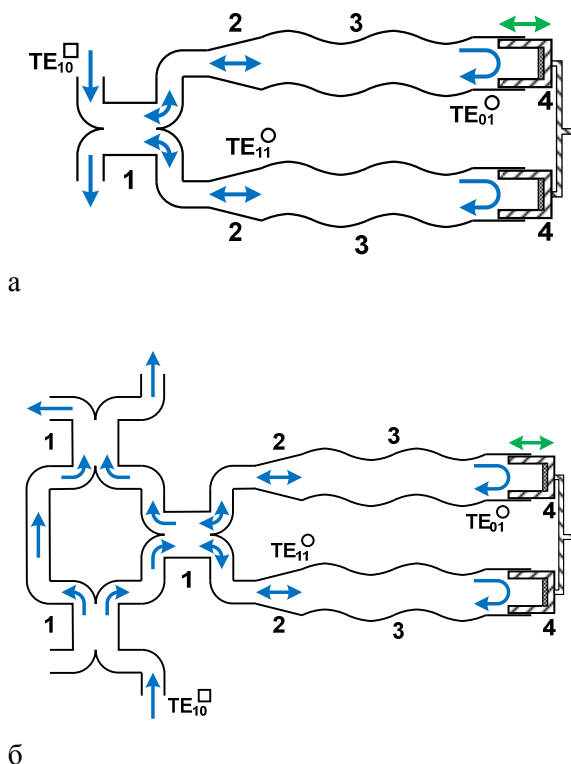


Рис. 3. Схема фазовращателя (а) и переключателя (б): 1 – 3 дБ ответвитель; 2 – переходы с волновода прямоугольного поперечного сечения на моде TE_{11} на волновод круглого сечения на моде TE_{11} ; 3 – преобразователи моды TE_{11} в моду TE_{01} круглого волновода; 4 – перемещаемые поршни-отражатели с поглотителями излучения внутри

де вакуумной керамики. Поглотитель за счет заглубления внутрь закритического волновода не оказывает влияния на рабочую

волну, однако способен поглощать паразитные моды с меньшими значениями частот отсечки по сравнению с рабочей. Таким способом в фазовращателе решается проблема подавления паразитных запертых мод, которые могли бы возникать между входами преобразователей и поршнями.

Принцип работы дистанционно управляемого переключателя схож с принципом действия фазовращателя. В схему переключателя (рис. 3, б) добавлены еще два трехдецибелных ответвителя, которые обеспечивают интерференцию половины сигнала с входа устройства и сигнала, выходящего с контролируемой поршнями фазой из системы каналов, идентичной описанному фазовращателю. Тем самым в зависимости от разности фаз сигналов, приходящих к выходному 3 дБ ответвителю, можно менять относительную мощность излучения в выходных портах устройства в пределах от 0 до 1.

Расчет фазовращателя и переключателя

Расчет 3 дБ ответвителя производился на основе поиска геометрических параметров, обеспечивающих минимальное отражение и равенство потоков мощностей в портах 3 и 4 при возбуждении его из порта 1 (рис. 4, а). Найденные оптимальные параметры приведены в табл. 1. На рис. 4, б показаны результаты расчета коэффициентов отражения и прохождения при найденных параметрах,

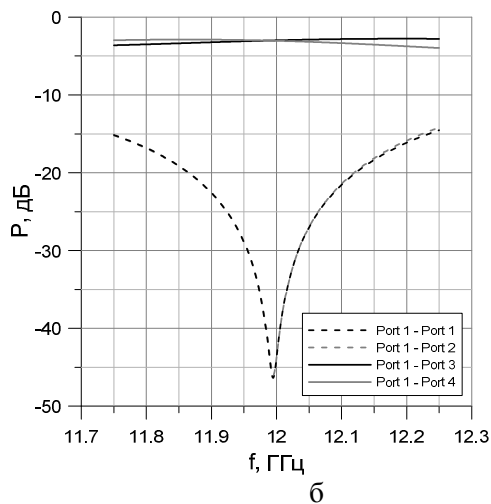
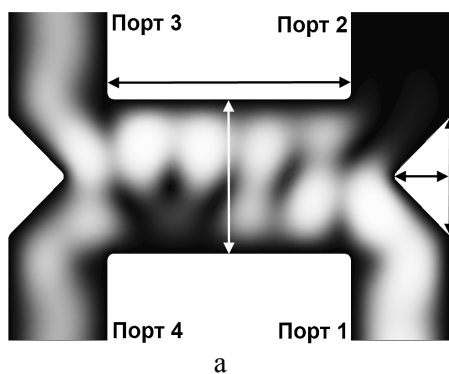


Рис. 4. 3 дБ ответвитель с распределением среднеквадратичного значения электрического поля на рабочей частоте (а) и зависимость коэффициентов отражения и прохождения для ответвителя от частоты (б)

Таблица 1

Параметры 3 дБ ответвителя

Параметр	Значение, мм
Длина центральной части	56,48
Ширина центральной части	35,62
Высота треугольного выступа	13,3
Ширина треугольного выступа	27
Радиус скругления выступа	1,5
Радиусы скругления сочленений волноводов	2

Таблица 2

Параметры TE₁₁ – TE₀₁ преобразователя

Параметр	Значение, мм
r_0	18,58
l	2,12
D	72,55
Длина преобразователя = $4 \times D$	290,2

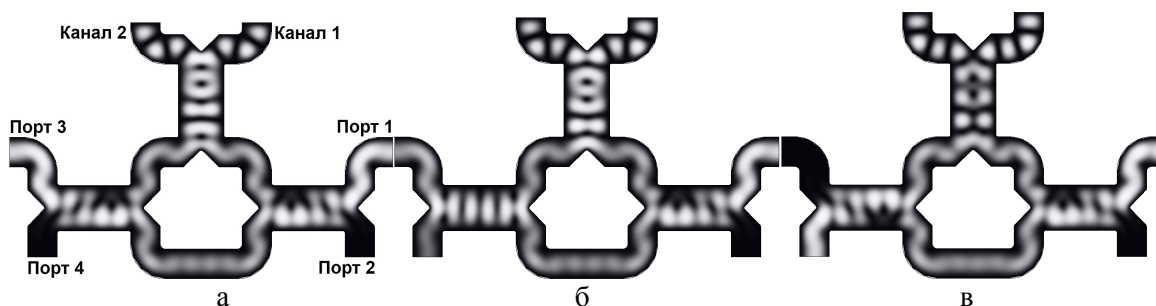


Рис. 5. Распределение среднеквадратичного электрического поля в зависимости от фазы отражения из каналов 1 и 2: а – вся мощность передается в третий порт; б – мощность делится пополам между третьим и четвертым портами; в – вся мощность направляется в четвертый порт

а на рис. 4, а – также распределение электрического поля на рабочей частоте.

В каналах фазовращателя и переключателя были использованы плавные переходы с прямоугольного волновода на моде TE₁₀ к круглому волноводу на моде TE₁₁ в сочетании с преобразователями TE₁₁–TE₀₁, типа «змейки» с эффективностью около 99 % [6]. Внутренний профиль последнего упомянутого преобразователя в цилиндрических координатах (r, z, φ), ось z которых совпадает с осью преобразователя, записывается в виде простой формулы:

$$r(z, \varphi) = r_0 + l \cdot \sin\left(\frac{2\pi z}{D}\right) \cdot \cos \varphi, \quad (1)$$

где r_0 – средний радиус преобразователя; l – амплитуда деформации; D – период биений волн TE₁₁ и TE₀₁ в невозмущенном волново-

де с радиусом r_0 . Параметры преобразователя на частоту 12 ГГц приведены в табл. 2.

Вносимая фазовращателем фаза определяется двойным пробегом волны TE₀₁ на длине смещения поршней:

$$\varphi = 2h \cdot L, \quad (2)$$

где h – постоянная распространения моды TE₀₁; L – величина смещения поршня от исходного положения. Исходя из (2), длина хода поршня была выбрана 25 мм, чтобы в волноводе диаметром 37,16 мм с запасом обеспечить изменение фазы в полном диапазоне 0–360°.

Рассчитанный ответвитель и упомянутый преобразователь были также использованы для моделирования работы переключателя. Результаты моделирования представлены на рис. 5, где показаны распределения полей в переключателе при возбуждении его из пор-

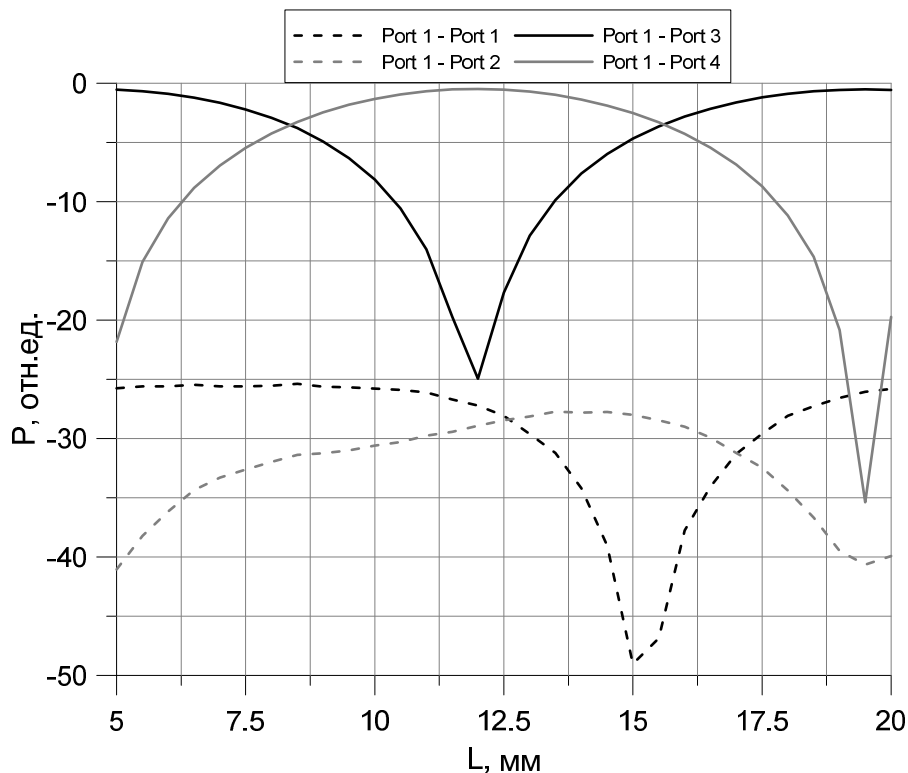


Рис. 6. Расчетный график мощностей в портах переключателя в зависимости от положения поршней

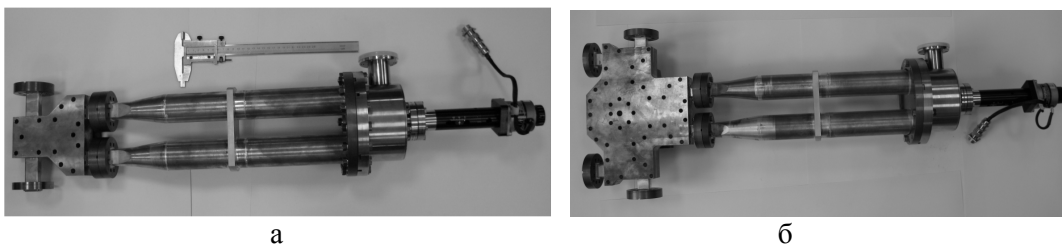


Рис. 7. Фотографии фазовращателя (а) и переключателя (б)

та 1 с различными фазами полного отражения из каналов 1 и 2, соответствующих различным положениям поршней. Расчетный график мощностей в портах в зависимости от положения поршней показан на рис. 6 (с учетом потерь в медных стенках).

Тестирование переключателя и фазовращателя на низком уровне мощности

Расчитанные фазовращатель и переключатель были изготовлены в вакуумированном варианте из бескислородной меди (рис. 7). Поршни в обоих каналах были же-

стко соединены между собой с помощью металлической пластины и заключены в единый блок из нержавеющей стали, имевший порт откачки и вакуумный фланец для подсоединения шагового мотора.

Для измерения отражения от фазовращателя был использован анализатор цепей, дополненный циркулятором и аттенуатором для исключения возможных переотражений в измерительных каналах (рис. 8, а). Измеренное в такой схеме значение отражения в диапазоне 11,95–12,05 ГГц не превосходило 0,3 %.

Для измерения вносимой фазовращателем фазы была использована схема (рис. 8, б) на

основе волноводной измерительной линии. Измерительная линия, представлявшая собой участок прямоугольного одномодового волновода с узкой щелью в широкой стенке и установленным в ней детектором, позволяла измерять величину поля стоячей волны, возникающей при отражении от 100 % отражателя на конце фазовращателя. При перемещении поршней изменялась вносимая фаза волны, и соответственно изменялось положение максимумов и минимумов стоячей волны, что и фиксировалось детектором измерительной линии. Из графика интенсивности поля стоячей волны от положения поршней (рис. 9, а) была восстановлена фаза. Для этого была использована аппроксимирующая зависимость напряжения, снимаемого с детектора, от положения поршней в виде

$$U(L) = A \cdot \cos^2(\varphi(L) + \varphi_0), \quad (3)$$

в которой зависимость вносимой фазы $\varphi(L)$ была выбрана в виде

$$\varphi(L) = 2h \cdot L + \alpha \cdot L^2 + \beta \cdot L^3, \quad (4)$$

Параметры A , α , β и φ_0 в (3)–(4) находились из условия наилучшей интерполяции экспериментально снятой зависимости $U(L)$. Смысл введения в (4) дополнительных по сравнению с (2) членов состоял в попытке учета возможных низкодобротных запертых резонансов между поршнями и входами преобразователей.

Результат обработки результатов измерений по описанной методике показан на

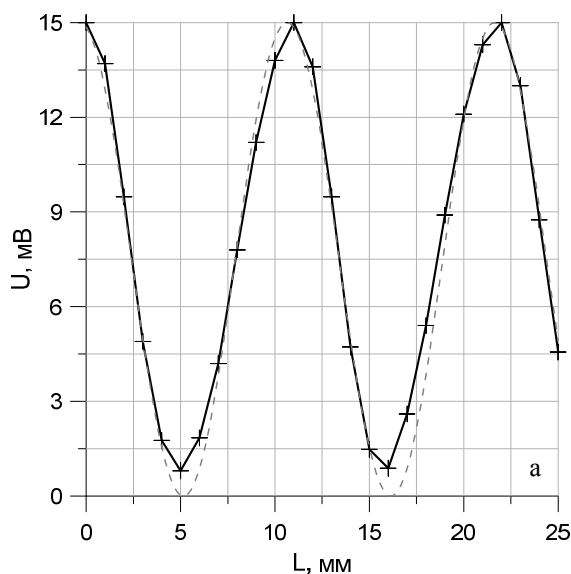


Рис. 9. Измерения вносимой фазы: а – величина квадрата поля стоячей волны в измерительной линии в зависимости от положения поршней (крестики) и аппроксимирующая ее кривая (пунктир); б – фаза волны, вносимой фазовращателем (крестики) и фаза (пунктир), построенная согласно уравнению (1)

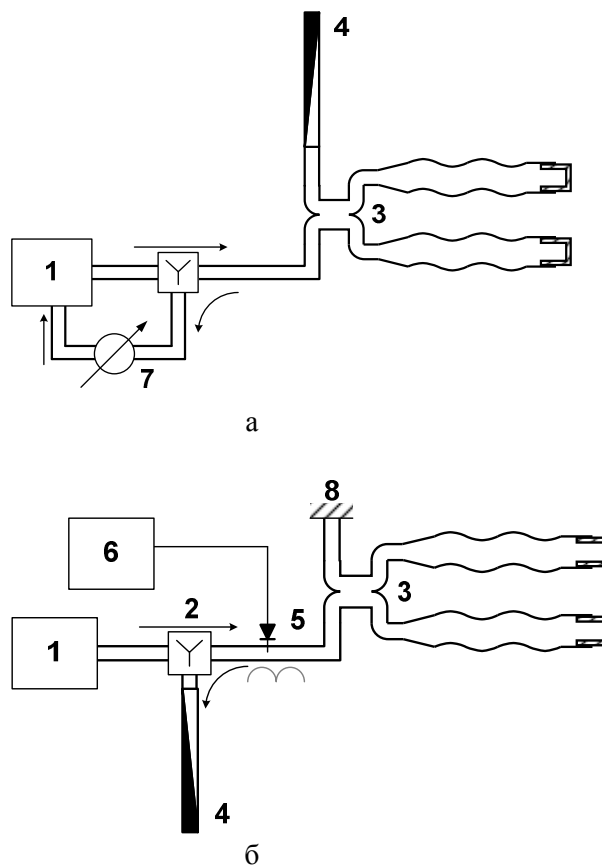


Рис. 8. Схема измерения коэффициента отражения от фазовращателя (а) и схема измерения вносимой им фазы (б): 1 – анализатор цепей; 2 – циркулятор; 3 – тестируемый фазовращатель; 4 – согласованная нагрузка; 5 – измерительная линия с детектором излучения; 6 – осциллограф; 7 – аттенуатор; 8 – 100 % отражатель

рис. 9, б. Отличие определенной таким путем вносимой фазы от фазы, определяемой уравнением (2), не превысило 0,03 рад, что может интерпретироваться как достаточно сильное подавление запертых резонансов за счет встроенных в поршни поглотителей.

Измерения отражения от переключателя и зависимости мощностей в портах от по-

ложения поршней были выполнены на основе схем, представленных на рис. 10, а, б соответственно. Результаты этих измерений на рабочей частоте изображены на рис. 11, из которых следует, что отражение составляло порядка 1 %, паразитная утечка в порт 2 – менее 1 %, а суммарные потери (включая омические) составили порядка 5 %.

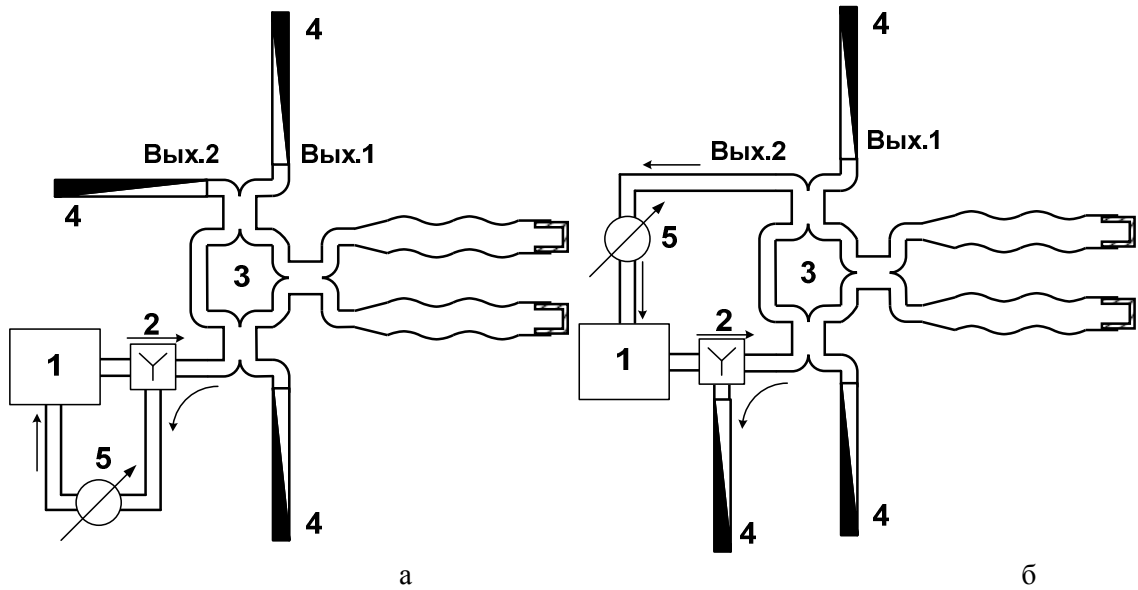


Рис. 10. Схема проверки работы дистанционно управляемого переключателя: а – измерение отражения; б – измерение распределения мощностей в выходных портах (1 – анализатор цепей; 2 – циркулятор; 3 – тестируемый переключатель; 4 – согласованные нагрузки; 5 – аттенюатор)

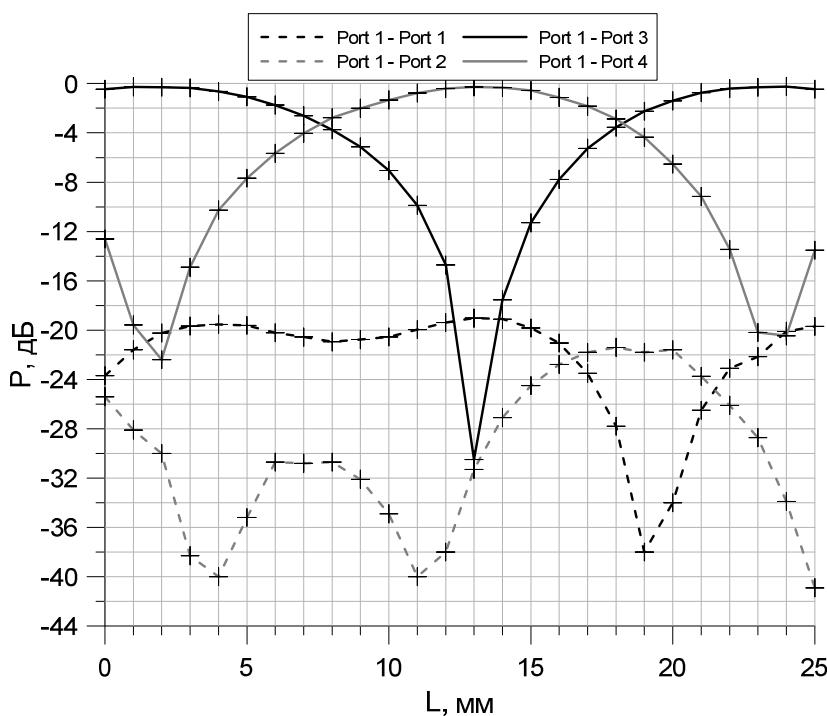


Рис. 11. Экспериментальные зависимости мощностей сигналов в портах тестируемого переключателя в зависимости от положения поршней

Оба изготовленных устройства используются в настоящее время в нескольких экспериментах, проводимых в CERN, в которых предельная (не вызывающая пробоев) мощность излучения составила 90 МВт при длительности импульсов ~200 нс.

Заключение

Исследованы дистанционно управляемые переключатель и фазовращатель на частоту 12 ГГц, предназначенные для работы на высоком уровне мощности излучения.

Переключатель имеет коэффициент отражения по мощности ~1 %, плавное переключение относительной мощности выходных каналов – от менее 1 до 95 % (5 % – вносимые потери).

Фазовращатель имеет коэффициент отражения по мощности менее 0,3 % и обеспечивает перестройку вносимой им фазы в пределах от 0 до 410°.

Список литературы

1. CLIC 2008 Parameters; CERN-OPEN-2008-021. <http://cdsweb.cern.ch/record/1132079/files/CERN-OPEN-2008-021.pdf>
2. McIntosh P. et al. Realization of an X-Band RF System for LCLS // Proc. PAC. Knoxville, Tennessee, 2005.
3. Corsini R. CLIC workshop; CERN; Oct. 2009. <http://cdsweb.cern.ch/record/559331/files>
4. Ziemann V. Data Analysis for PETS Recirculation, CTF3-Note-094, 2009. <http://clic-study.web.cern.ch/CLIC-Study/CTF3/Notes/CTF3Note094.pdf>
5. Farkas Z. D., Hogg H. A., Locw G. A., Willson P. B. SLED: A Method of Doubling SLAC's Energy. SLAC-PUB-1453. 1974.
6. Kuzikov S. V., Denisov G. G., Heikkinen S. et al. Study of Ka-Band High-Power Transmission Lines // AIP Conf. Proc. 7th Workshop on High Energy Density and High Power RF / Eds. D. K. Abe, G. Nusinovich. Greece, 2006. Vol. 807. P. 424–430.

Материал поступил в редакцию 10.11.2010

A. A. Vikharev, S. V. Kuzikov

REMOTELY CONTROLLED WAVEGUIDE SWITCHES AND PHASE SHIFTERS FOR HIGH-POWER TESTS OF ACCELERATING STRUCTURES

The paper considers a switch and a phase shifter with an operating frequency of 12 GHz, which are tunable by using electric step motors. The both devices are based on rectangular WR90 waveguides and are designed to operate at 100 MW power level and pulse durations of up to 10³ ns.

Keywords: waveguide switch, phase shifter, accelerating structure.