

УДК 537.874.2

## КВАЗИОПТИЧЕСКИЙ ИНТЕРФЕРОМЕТР МАХА—ЦЕНДЕРА С ОТРАЖАТЕЛЬНЫМИ ДИФРАКЦИОННЫМИ РЕШЁТКАМИ В КАЧЕСТВЕ ДИПЛЕКСЕРА

С. Н. Власов<sup>1</sup>, С. В. Катин<sup>2</sup>, Е. В. Копосова<sup>1</sup>, Л. В. Лубяко<sup>1\*</sup>, Л. И. Прокофьев<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Институт прикладной физики РАН;

<sup>2</sup> Научно-исследовательский институт измерительных систем им. Ю. Е. Седакова,  
г. Нижний Новгород, Россия

Представлен макет квазиоптического интерферометра Маха—Цендера с делителями волнового пучка в виде отражательных дифракционных решёток. Экспериментально исследованы характеристики диплексера на частотах в окрестности 140 ГГц. Результаты измерений близки к расчётным.

### ВВЕДЕНИЕ

Квазиоптические аналоги волноводных элементов традиционно используются при создании функциональных узлов с малыми потерями в коротковолновой части миллиметрового диапазона длин волн. Для применения в системах электронно-циклотронного нагрева плазмы в современных установках управляемого термоядерного синтеза с использованием излучения мегаваттного уровня мощности требуется электропрочная элементная база, что существенно ограничивает выбор технических решений. В измерительной и приёмной аппаратуре 70-х годов в качестве диплексера широко применялся интерферометр Маха—Цендера на сверхразмерных волноводах [1, 2] с диэлектрическими пластинками в качестве делителей мощности. Единственный диэлектрик, который позволяет работать при столь высокой мощности, — малодоступный на сегодняшний день синтетический алмаз [3, 4].

Другое, более простое решение проблемы заключается в использовании диплексера на основе открытого резонатора с отражательной дифракционной решёткой [5] в качестве элемента связи с высокочастотным трактом. Диплексер был предложен, смоделирован и экспериментально испытан [6] при мегаваттном уровне мощности излучения в ходе совместных работ ИПФ РАН, Института физики плазмы Общества Макса Планка и Института горения и силовых установок (Германия). В работе [7] обсуждалась возможность создания интерферометра Маха—Цендера с такими решётками, позволяющего поднять рабочий уровень мощности излучения за счёт отказа от использования резонатора.

В настоящей работе представлен макет нерезонансного диплексера для работы на частотах около 140 ГГц. Обсуждаются выбор оптической схемы, методика расчёта зеркал и результаты экспериментального исследования характеристик диплексера.

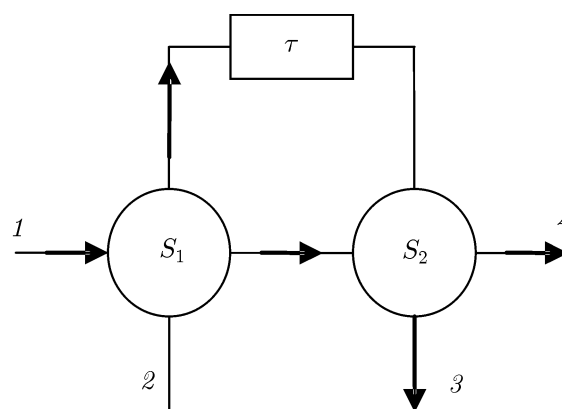


Рис. 1. Блок-схема интерферометра Маха—Цендера: 1, 2 — входы, 3, 4 — выходы,  $S_1$ ,  $S_2$  — делители мощности,  $\tau$  — линия задержки

\* lub@appl.sci-nnov.ru

## 1. ИНТЕРФЕРОМЕТР МАХА—ЦЕНДЕРА КАК ДИПЛЕКСЕР

Интерферометр Маха—Цендера (рис. 1) можно представить как восьмиполосник из двух включённых последовательно делителей мощности ( $S_1$  и  $S_2$ ). Подаваемое на вход (1 или 2) излучение с помощью элемента  $S_1$  делится на два равных по интенсивности потока, которые, каждый по своему пути, поступают на разные входы делителя  $S_2$  и складываются с учётом разности фаз из-за различия длин каналов.

Коэффициенты передачи интерферометра по мощности равны

$$\begin{aligned} K_{13} &= \cos^2(\pi f \tau), & K_{14} &= \sin^2(\pi f \tau), \\ K_{23} &= \sin^2(\pi f \tau), & K_{24} &= \cos^2(\pi f \tau), \end{aligned}$$

где  $f$  — частота,  $\tau$  — задержка из-за разности хода интерферирующих волн, пара индексов соответствует номерам входа и выхода (рис. 1). Выбором разности хода можно задавать периодичность частотной зависимости коэффициентов передачи. Очевидно, что для сложения двух монохроматических сигналов с частотами  $f_1$  и  $f_2$  на одном из выходов достаточно выбрать  $\tau = 1/[2(f_1 - f_2)]$ . Такой сумматор при соответствующем быстром переключении частот сигналов осуществляет быструю коммутацию выходов, что может использоваться для управления системой электронно-циклотронного нагрева плазмы с целью повышения эффективности подавления тиринг-моды в установках управляемого термоядерного синтеза.

## 2. ОТРАЖАТЕЛЬНАЯ ФАЗОВАЯ ДИФРАКЦИОННАЯ РЕШЁТКА

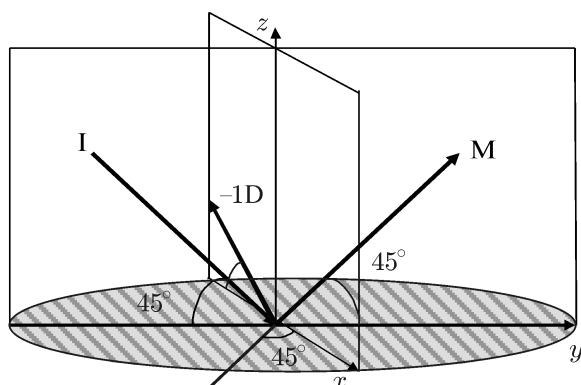


Рис. 2. Делитель мощности с фазовой решёткой: I — входной луч, M — луч, отражённый в зеркальном направлении, -1D — дифракционный луч порядка -1

(порядка -1). В нашем случае реализуется один из простейших случаев рассеяния: угол падения составляет  $45^\circ$  и, соответственно, зеркальный луч также лежит в плоскости падения  $yz$  и отражается от решётки под углом  $45^\circ$ . Дифракционный луч также отражается под углом  $45^\circ$ , но лежит в плоскости  $xz$ , ортогональной плоскости падения. Решётка развёрнута относительно вертикальной оси, проходящей через её центр, под углом  $45^\circ$  относительно оси  $x$ .

Мы использовали простейший для расчёта синусоидальный профиль гофрировки решётки. При нём деление мощности падающего пучка пополам возможно только при определённой поляризации последнего, в качестве которой была выбрана  $E$ -мода решётки [8, 9] с проекцией вектора

Одной из альтернатив диэлектрической пластинке является металлическая фазовая дифракционная решётка, которая также позволяет реализовать квазиоптический аналог волноводного мостового гибридного устройства, необходимого для построения двухлучевого интерферометра. Характеристики такого ответвителя при заданной геометрии полностью определяются параметрами отражательной фазовой решётки (рис. 2), представляющей собой плоскую металлическую пластину, рабочая сторона которой гофрирована. Выбор параметров гофрировки при требуемой геометрии должен обеспечивать существование при входном падающем пучке I лишь двух равных по интенсивности отражённых лучей, зеркального M и дифракционного -1D

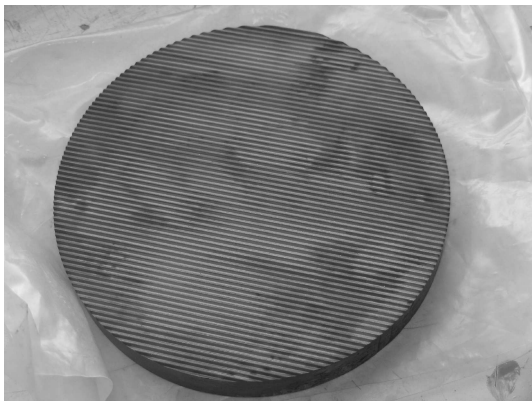


Рис. 3. Фазовая отражательная решётка для гибридного устройства, работающего на частотах около 140 ГГц

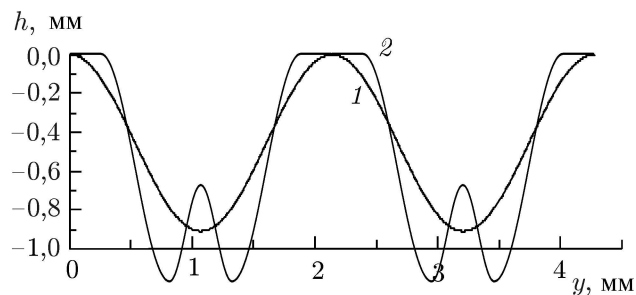


Рис. 4. Синусоидальный профиль (кривая 1) и профиль, универсальный к поляризации [10] падающего излучения (кривая 2), для частот около 140 ГГц ( $h$  — высота профиля)

электрического поля на плоскость решётки, направленной вдоль её рёбер. Расчёт фазовых решёток для работы на частотах около 140 ГГц выполнялся с помощью пакета программ [10]. Фазовая отражательная решётка (рис. 3) представляет собой медный диск с диаметром 150 мм и толщиной 20 мм, одна из плоских сторон которого гофрирована по синусоидальному закону. Параметры гофрировки для частот около 140 ГГц следующие: период  $d = 2,14$  мм, амплитуда  $A = 0,45$  мм. Решётка изготавливалась с помощью электроэрозионной технологии.

Отметим, что работа при произвольной поляризации возможна при использовании решётки [10] с профилем, обеспечивающим равенство коэффициентов отражения для двух ортогональных собственных мод решётки. Такой профиль не является синусоидальным. На рис. 4 приведён пример универсального профиля, при котором пучок делится на два пучка с одинаковыми фазами и мощностями, в сравнении с синусоидальным профилем в приведённом масштабе. Видно, что профиль решётки становится более сложным, характерный размер деталей уменьшается в несколько раз, что затрудняет изготовление решётки с необходимой точностью для работы на частотах порядка 140 ГГц.

### 3. ОПТИЧЕСКАЯ СХЕМА ДИПЛЕКСЕРА

Оптическая схема макета диплексера разрабатывалась с учётом того, что в нашем распоряжении было только одно, изготовленное для работы с линией на сверхразмерном волноводе (с диаметром 110 мм), гофрированное зеркало. Для сравнения характеристик последнего с расчётными был поставлен эксперимент с лабораторным макетом интерферометра Маха—Цендера. В разработанной конструкции лабораторного макета два участка большого зеркала используются в качестве входного и выходного делителей  $S_1$  и  $S_2$ . Это потребовало несколько усложнить конструкцию. Поскольку мы не могли развернуть второе гофрированное зеркало нужным образом относительно первого, то пришлось ввести дополнительный «переброс» пучка, чтобы обеспечить необходимую поляризацию.

Таким образом, два гофрированных зеркала  $S_1$  и  $S_2$  (рис. 5) лежат в одной плоскости  $XU$  и имеют одинаковое направление гофрировки. Плоскость  $XU$  мы будем считать базовой. Зеркала  $S_1$  и  $S_2$  сдвинуты относительно друг друга в направлении оси  $Y$ . В конструкции макета используется зеркальная линия передач. В коротком прямом канале, соединяющем один из выходов первого гибридного устройства с входом второго, использовано одно зеркало (V), плос-

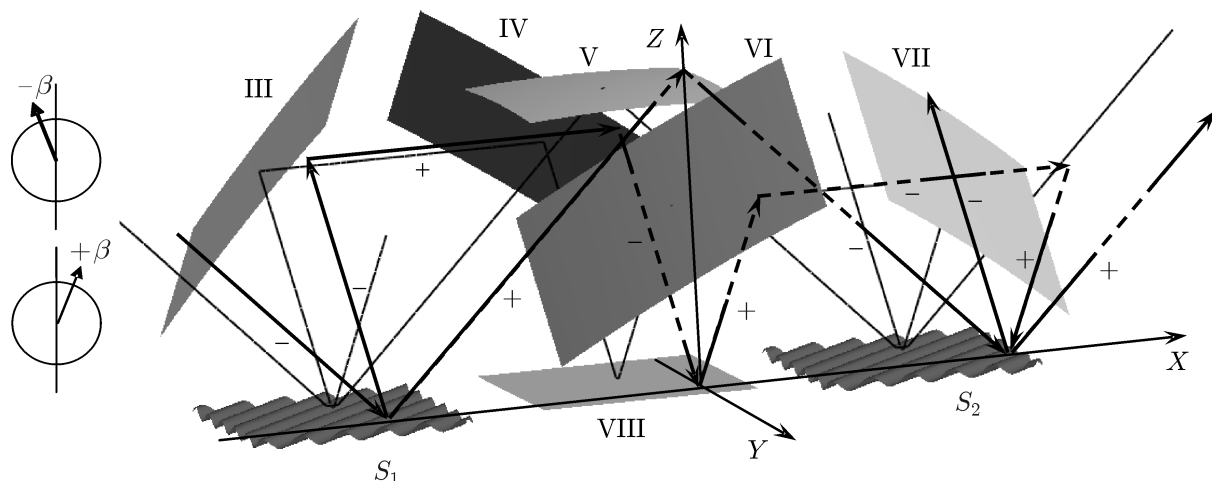


Рис. 5. Оптическая схема интерферометра Маха—Цендера:  $S_1$  и  $S_2$  — гибридные устройства, III–VIII — зеркала

кость которого параллельна базовой плоскости. Волновой пучок в коротком плече соответствует нулевому порядку дифракции и распространяется в плоскости  $XZ$ , проходящей через центры гофрированных зеркал перпендикулярно базовой плоскости. Второй длинный канал играет роль линии задержки по отношению к первому каналу. Волновой пучок в длинном плече, в котором 5 зеркал (III, IV, VIII, VI, VII), соответствует  $(-1)$ -му дифракционному порядку. Этот пучок сначала распространяется под углом  $\theta = 45^\circ$  к базовой плоскости, далее отражается от зеркал III и IV, разворачивается на  $180^\circ$  и попадает на плоское зеркало VIII, плоскость которого совпадает с базовой, а далее через симметричную пару зеркал VI и VII попадает на второе гофрированное зеркало.

Расчёт изменения поляризации при распространении волновых пучков и отражении их от зеркал проводился по методике, изложенной в работах [5, 6, 11–13]. При этом учитывалось, что дифракционная решётка функционировала на  $E$ -моду, в которой проекция вектора электрического поля на плоскость зеркала параллельна рёбрам решётки. Направление вектора электрического поля в распространяющихся пучках можно характеризовать углом  $\beta$  между направлением этого вектора и плоскостью падения на предыдущее зеркало. Поляризация во входном пучке определялась углом падения  $\theta$  на плоскость входного гибридного устройства  $S_1$  и углом  $\gamma$  между направлением рёбер и плоскостью падения. Изменение угла  $\beta$  в пучке, распространяющемся по короткому и длинному путям через зеркало V и, соответственно, зеркала III, IV, VIII, VI, VII приведено на рис. 5 (символы + и -). В макете были выбраны углы  $\theta = 45^\circ$ ,  $\gamma = 45^\circ$  и, следовательно,  $\beta = -35,3^\circ$ . Внизу рисунка показано направление вектора электрического поля в плоскости, перпендикулярной направлению распространения пучка при различных знаках угла  $\beta$ , причём при  $\beta = 0$  вектор электрического поля падающей волны лежит в плоскости падения.

Расчёт структур пучков по мере распространения проводился по «безабберационным» формулам для ширины гауссовых пучков [14]:

$$a_x^2 = a_{x0}^2 + \frac{z^2}{k^2 a_{x0}^2}, \quad \frac{1}{R_x} = \frac{1}{a_x} \frac{da_x}{dz}.$$

Здесь предполагается, что модуль напряжённости электрического поля пропорционален  $\exp\{-x^2/[2a_x^2(z)]\}$ ,  $x$  — одна из декартовых координат, перпендикулярных направлению распространения пучка,  $a_x^2$  — квадрат ширины пучка по координате  $x$ ,  $z$  — координата вдоль направления распространения пучка,  $a_{x0}^2$  — квадрат ширины пучка при том значении координаты, когда

Таблица 1

Зеркала	Размер по оси $x$ , мм	Размер по оси $y$ , мм	Радиус кривизны по оси $x$ , мм	Радиус кривизны по оси $y$ , мм
VIII	37,5	37,5	—	—
III, IV, VI, VII	55,4	31,0	1 147	190
V	49,4	40,8	236	322

Зеркала	Расстояние между зеркалами, мм
$S_1$ -III, IV-VIII, VIII-VI, VII- $S_2$	50,0
III-IV, VI-VII	50,0
$S_1$ -V, V- $S_2$	70,7

пучок коллимирован ( $z = 0$ ),  $R_x$  — радиус кривизны волнового фронта пучка по соответствующей поперечной координате,  $k$  — волновое число. Влияние кривизны зеркал учитывалось согласно работе [15]. Параметры системы подбирались так, чтобы проекции пучков на плоскость гибридных устройств представляли собой круги с радиусом  $a_g = 7,5$  мм, причём пучки в точках пересечения с плоскостью этих устройств были коллимированы. Размеры зеркал  $S_1$ ,  $S_2$ , их радиусы кривизны и расстояния между ними приведены в табл. 1. Ось  $x$  лежит в плоскости падения луча на зеркало, а ось  $y$  ей перпендикулярна. Элементы  $S_1$ ,  $S_2$  представляли собой сегменты окружности с диаметром 150 мм и длиной хорды 141 мм.

#### 4. СТЕНД ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ДИПЛЕКСЕРА НА ЧАСТОТАХ ОКОЛО 140 ГГц

Диплексер исследовался на частотах около 140 ГГц на лабораторном стенде (рис. 6 и 7), который включает в себя источник излучения (лампу обратной волны типа ОВ-76), собственно диплексер (интерферометр Маха—Цендера) и регистрирующую часть. Лампа обратной волны характеризуется широким диапазоном перестройки частоты (125÷150 ГГц). Для точной ( $10^{-6}$ ) установки частоты использована система фазовой автоподстройки частоты по синтезатору РЧ6-02.

С выхода лампы обратной волны излучение с мощностью порядка 20 мВт по волноводу основного сечения поступает на формирователь гауссового пучка, включающего в себя волноводную скрутку, конический рупор, т. е. переход на сверхразмерный волновод (с диаметром 30 мм и длиной 150 мм), и два зеркала, формирующие пучок с эллиптическим сечением. Этим обеспечивается круговой профиль сечения пучка на решётке, что позволяет избавиться от различий в топологии пучков, поступающих с «зеркального» и дифракционного входов. С помощью скрутки (поворота сечения волновода) на  $35,5^\circ$  устанавливалась необходимая поляризация излучения для работы на  $E$ -моду.

Макет смонтирован на единой массивной текстолитовой плите. Гофрированное зеркало зафиксировано в отверстии в плите, что допускает его поворот относительно вертикальной оси при юстировке. Большинство зеркал (III, IV, VI, VII и VIII), образующих два канала передачи интерферометра, закреплены на единой стойке. Зеркало V, выполненное в виде тонкой плоской пластинки, укладывается непосредственно на поверхность решётки. Перемещение и поворот пластинки позволяет менять конфигурацию установки, что использовалось при измерениях. Так, при повороте на  $90^\circ$  она закрывала элементы  $S_1$  и  $S_2$  — «рабочие» участки решётки, и всё излучение по короткому пути поступало на детектор, установленный в этом канале. Сдвигая пластинку, мы

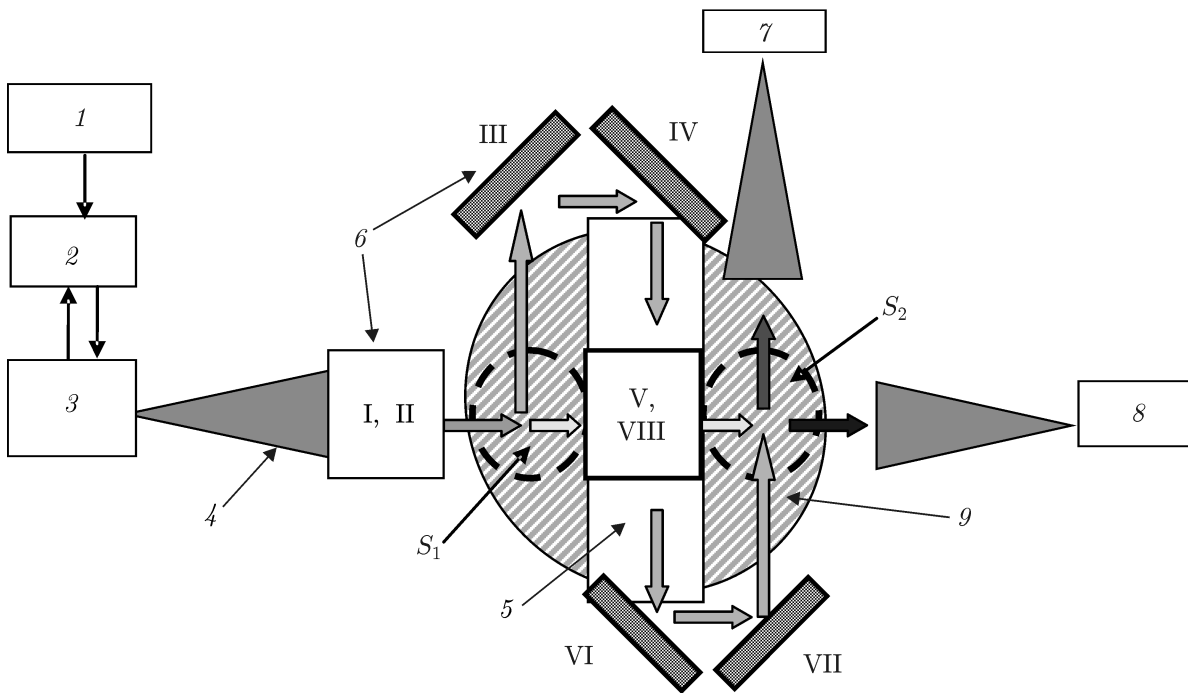


Рис. 6. Стенд для исследования интерферометра Маха—Цендера: 1 — синтезатор частоты, 2 — система фазовой автоподстройки частоты, 3 — лампа обратной волны ОВ-76, 4 — рупор, 5 — плоское зеркало V, 6 — зеркала, 7 и 8 — детекторы 1 и 2, 9 — фазовая дифракционная решётка

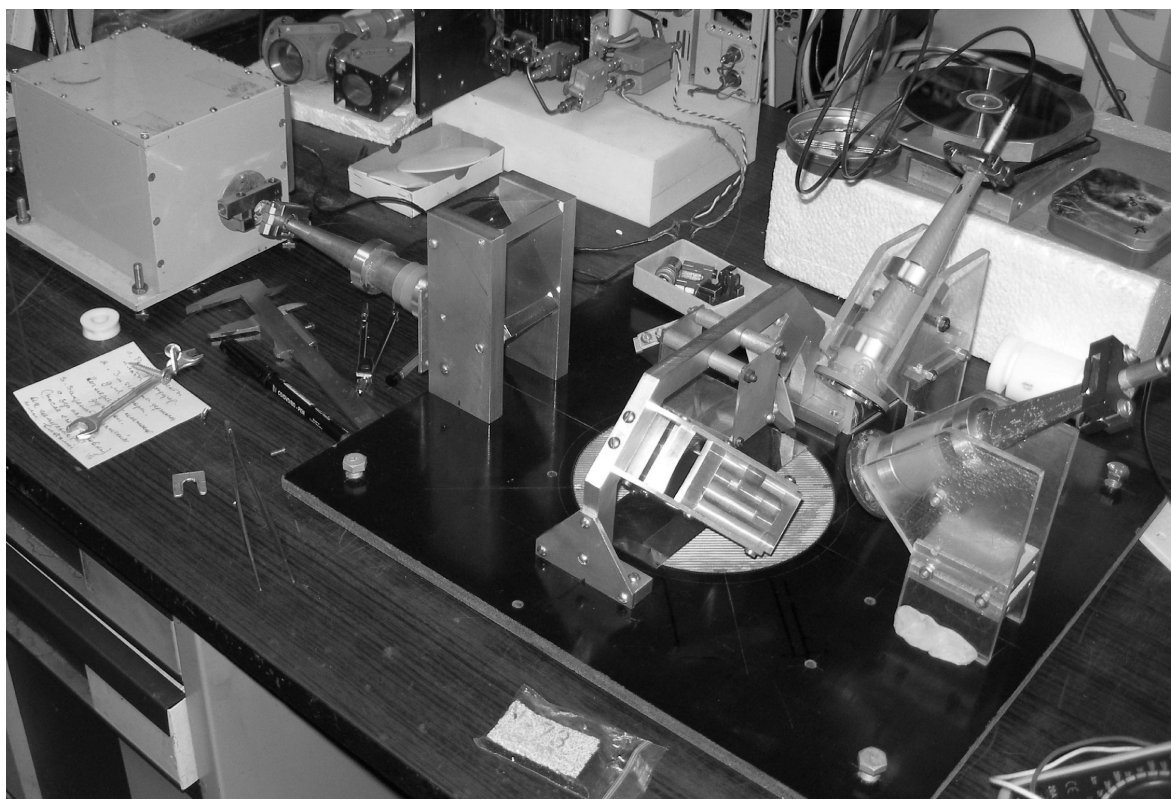


Рис. 7. Макет интерферометра Маха—Цендера для рабочих частот около 140 ГГц

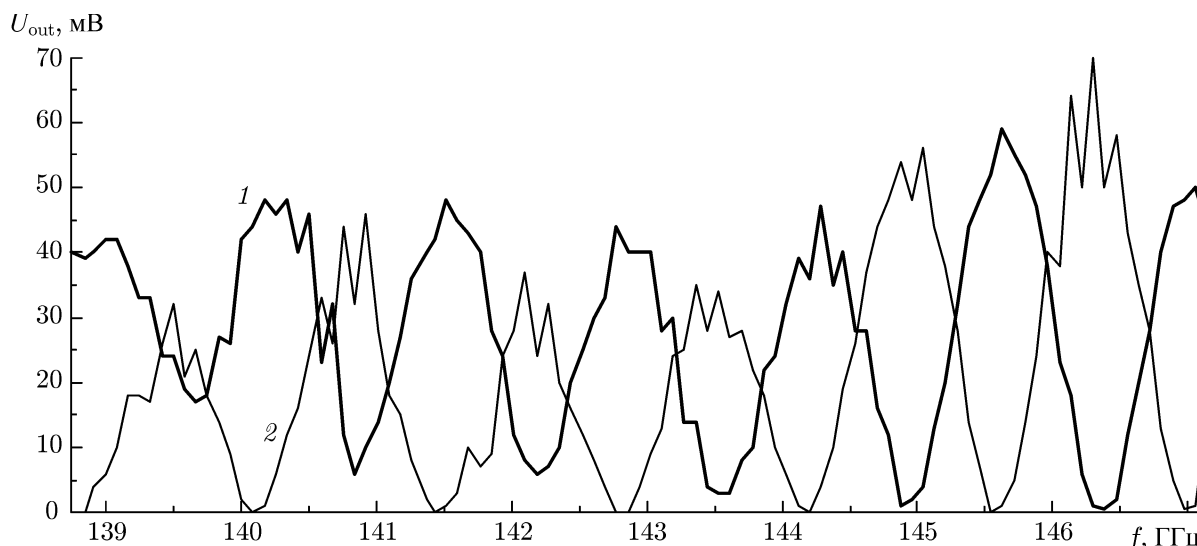


Рис. 8. Зависимость напряжения на выходе  $U_{out}$ , пропорционального (ненормированным) коэффициентам передачи  $K_{13}$  (кривая 1) и  $K_{14}$  (кривая 2) от частоты. Рабочая область частот находится в окрестности 146 ГГц

можем открывать либо элемент  $S_1$ , либо  $S_2$ , что позволяет измерить коэффициент деления на решётке и полные потери в системе.

Принцип действия регистрирующей части состоит в следующем. На каждом из выходов интерферометра с помощью рупоров, подобных установленному на входе интерферометра, включены квадратичные детекторы. Чувствительность детекторов практически одинакова. Сигналы с выходов детекторов, пропорциональные интенсивности излучения, регистрировались на экране двухканального осциллографа «Tektronix TDS 210».

## 5. РЕЗУЛЬТАТЫ ИЗМЕРЕНИЙ

Интерферометр исследовался в достаточно широкой полосе частот. Полученная зависимость коэффициентов передачи от частоты (рис. 8) представляет собой квазисинусоиду, период которой равен 1400 МГц и определяется разностью хода между каналами (в нашем случае около 200 мм). В низкочастотной части полосы 139÷143,5 ГГц, очевидно, не обеспечивается деление мощности пучка пополам, что приводит к тому, что коэффициент  $K_{13}$  не достигает нуля, а  $K_{14}$  — максимума. В качестве рабочей можно выделить область частот выше 144 ГГц, где достигается наибольший контраст между максимумом и минимумом (до 20 дБ).

Таким образом, показана возможность разделения двух сигналов с частотой около 140 ГГц, отстоящих по частоте на 700 МГц друг от друга и поступающих с общего входа, или, наоборот, их сложения, если они поступают с разных входов интерферометра. Рабочую область можно сдвигать в некоторых пределах путём небольшого изменения направления гофр (поворотом решётки).

Отметим, что наблюдаемая «изрезанность» интерференционной картины прежде всего связана с большим отражением от рупоров и интерференцией отражённых волн в «замкнутой» системе. Это связано и с неудовлетворительными характеристиками имевшихся у нас рупоров, и с отсутствием коррекции профиля принимаемых пучков. Детально эффект «изрезанности» не исследовался. Отметим, что этот эффект несущественен, т. к. в эксперименте с большой мощностью пучка требования к согласованию существенно более строгие и тракт не содержит подобных

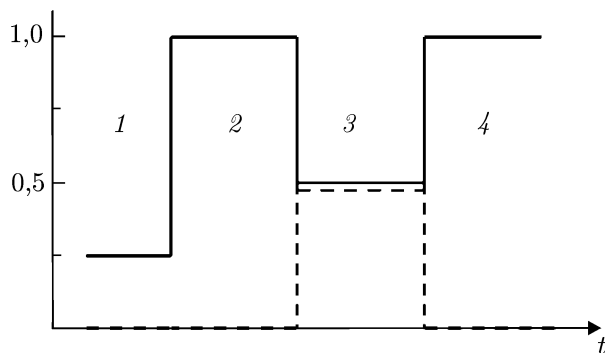


Рис. 9. Оциллограмма сигналов на выходах интерферометра: участок, где один из каналов интерферометра перекрыт (1), далее интерферометр настроен на максимум в одном из каналов (2), равные коэффициенты передачи каналов (3) и так же сравнение (4) с максимумом интерференции

элементов.

Непосредственное измерение коэффициента деления на решётке проводилось как на  $E$ -моде, так и на  $H$ -моде путём перемещения центрального плоского зеркала. На частотах рабочей области он равен 3 дБ на  $E$ -моде и близок к 1 на  $H$ -моде, когда большая часть излучения рассеивается в направлении  $(-1)$ -го дифракционного максимума.

Для иллюстрации на рис. 9 приведены оциллограммы, соответствующие выбору частоты, когда на одном выходе сигнал максимален, а на другом — минимален.

Потери в интерферометре измерялись подобным же образом: гибридные устройства  $S_1$  и  $S_2$  замещались плоскими зеркалами, что давало полный сигнал на выходе 4 (рис. 1), с которым сравнивался интерференционный максимум. Различие составляло менее 1 дБ. Точность измерения, к сожалению, ограничена из-за изрезанности графика зависимости коэффициента передачи от частоты, вызванной паразитными резонансами.

## 6. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В целом полученный результат демонстрирует хорошее совпадение с теоретическим расчётом, заложенным в модель интерферометра для рабочих частот около 140 ГГц. Отметим, что конструкция, предназначенная для большой мощности излучения, имеет существенные отличия от макета. Особенно важно, что она должна быть одномодовой и согласованной с подводящими и отводящими линиями. В целом же возможность создания диплексера на базе интерферометра Маха—Цендера с дифракционными решётками в качестве расщепителя пучка представляет интерес, т. к. позволяет повысить уровень рабочей мощности излучения по сравнению резонаторными конструкциями.

Определённые трудности вызывает желание сделать конструкцию компактной. Необходимое для переключения выходных каналов изменение частоты ограничено шириной зоны генерации гиротрона, которая составляет не более нескольких десятков мегагерц. Из этого вытекает требование создания большой разности хода между интерферирующими пучками, составляющей несколько метров. Понятно, что свернуть пучки в столь же небольшой объём, как у резонаторных диплексеров, проблематично.

Авторы благодарны М. И. Петелину за плодотворную дискуссию, а также Е. Л. Певзнеру за помощь в создании макета. Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проекты 13-02-00611 и 11-02-97080-р\_поволжье\_a).



## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Bleed I., Bresson A., Popoular R., Wegrowe J. G. // *L'onde électrique*. 1964. V. 44, No. 442. P. 6.
2. Fedoseyev L. I., Kulikov Yu. Yu. // *Radio Eng. and Electron Phys.* 1971. V. 16. P. 637.
3. Manheimer W., Fliflet A., Germain K. S., et al. // *Geophys. Res. Lett.* 2003. V. 30, No. 3. P. 1 103.
4. Wubie W., Kasperek W., Plaum B. // *Proc. 33rd Int. Conf. Infrared, Millimeter and Terahertz Waves*. Pasadena, Sept. 2008. P. 1.
5. Кошуринов Ю. И., Павельев В. Г., Петелин М. И. и др. // *Письма в ЖТФ*. 2005. Т. 31, № 16. С. 73.
6. Erckmann V., Kasperek W., Koshurinov Y., et al. // *Fusion Sci. Technol.* 2009. V. 55, No. 1. P. 23.
7. Thumm M., Kasperek W. // *IEEE Trans. Plasma Sci.* 2002. PS-30 P. 755.
8. *Electromagnetic theory of gratings* / Ed. by R. Petit. Berlin, Heidelberg, New York: Springer-Verlag, 1980. 286 p.
9. Шестопапов В. П., Кириленко А. А., Масалов С. А., Сиренко Ю. К. Резонансное рассеяние волн. Т. 1. Дифракционные решётки. Киев: Наукова думка, 1986. 232 с.
10. Власов С. Н., Копосова Е. В., Кошуринов Ю. И. и др. // *Журн. техн. физики*. 2012. Т. 82, № 7. С. 92.
11. Вайнштейн Л. А. Электромагнитные волны. М.: Радио и связь, 1988. 440 с.
12. Каценеленбаум Б. З. Высокочастотная электродинамика. М.: Наука, 1966. 240 с.
13. Власов С. Н., Копосова Е. В., Кошуринов Ю. И. и др. // *Изв. вузов. Радиофизика*. 2012. Т. 55, № 6. С. 440.
14. Власов С. Н., Петрищев В. А., Таланов В. И. // *Изв. вузов. Радиофизика*. 1971. Т. 14, № 9. С. 1 353.
15. Бондаренко Н. Г., Таланов В. И. // *Изв. вузов. Радиофизика*. 1964. Т. 7, № 2. С. 313.

Поступила в редакцию 3 февраля 2015 г.; принята в печать 30 июля 2015 г.

**QUASIOPTICAL MACH—ZEHNDER INTERFEROMETER WITH A REFLECTIVE DIFFRACTION GRATING ACTING AS A POWER SPLITTER**

*S. N. Vlasov, S. V. Katin, E. V. Kuposova, L. V. Lubyako, and L. I. Prokofyev*

We present a prototype of a quasioptical Mach—Zehnder interferometer with wave beam splitters in the form of reflective diffraction gratings. Characteristics of the diplexer are studied experimentally at frequencies of about 140 GHz. The measurement results are close to the calculated ones.