

РАЗРАБОТКА И ИССЛЕДОВАНИЕ ВОЛНОВОДНЫХ ФИЛЬТРОВ ТЕРАГЕРЦОВОГО И СУБТЕРАГЕРЦОВОГО ДИАПАЗОНОВ ЧАСТОТ

© 2012 г. В. С. Сызранов, А. С. Ермолов, С. П. Лебедев*, В. Н. Мурзин

*Физический институт им П.Н. Лебедева РАН
Россия, 119991, Москва, Ленинский просп., 53*

**Институт общей физики им. А.М. Прохорова РАН
Россия, 119991, Москва, ул. Вавилова, 38*

Поступила в редакцию 10.11.2011 г.

После доработки 23.01.2012 г.

Представлено устройство фильтрации электромагнитного излучения терагерцового и субтерагерцового диапазонов, основанное на использовании избирательных частотных свойств заперделного волновода, а также квазиоптических (оптико-волноводных) методов согласования со средой окружения. Приведены конструкция устройства фильтрации излучения в области частот от 100 ГГц до нескольких терагерц, а также результаты измерений амплитудно-частотных характеристик тестовых фильтров в диапазоне 100–700 ГГц. Принцип построения и конструкция фильтра позволяют при незначительном затухании в полосе пропускания получить резкую и предсказуемую границу полосы пропускания при значительном подавлении низкочастотного излучения в области непрозрачности. Экспериментально измеренное в области пропускания фильтров затухание находится на уровне 6–12 дБ, вне полосы пропускания – на уровне 30–60 дБ, при этом полученный результат определяется шумами испытательной установки. Показано, что теоретическое значение затухания вне полосы пропускания может достигать >60 дБ при частоте лишь на 10% меньше критической. Разработанный фильтр может применяться для определения и изучения спектра в субтерагерцовом и терагерцовом диапазонах, особенно в случаях, требующих резкой спектральной границы и исключения длинноволновых компонент излучения.

1. ВВЕДЕНИЕ

Развитие методов фильтрации, регистрации и преобразования электромагнитных волн субтерагерцового и терагерцового частотных диапазонов является одной из актуальных проблем, востребованных в ряде областей науки и техники. Активно ведутся исследования терагерцового излучения для определения его влияния на различные биологические объекты с целью применения в медицине, сферах визуализации, системах безопасности и др. [1]. Изображения, полученные в этом диапазоне, могут регистрироваться с высокой разрешающей способностью, позволяющей различать детали размером в десятые доли миллиметра. Быстро развивающимся является раздел радиоастрономии, связанный с изучением в терагерцовом диапазоне свойств космических объектов.

Терагерцовый диапазон занимает в электромагнитном спектре промежуточное положение между оптической областью и радиодиапазоном (0.1–10 ТГц), частично перекрывая диапазоны крайне высоких (к.в.ч.) и гипервысоких частот (г.в.ч.). Применение в этом диапазоне стандартных оптических или радиочастотных методов сопряжено со значительными трудностями [2]. Оптические методы с уменьшением энергии

фотонов и ростом длины волны излучения становятся малоэффективными и чувствительными к искажениям фронта волны. Так, методы, основанные на избирательных (частотных) свойствах материалов (полиметиленовые, фторопластовые и другие [3]), не обеспечивают требуемой избирательности. Интерференционные фильтры, оперирующие выделенными областями спектрального излучения [4], имеют относительно большие габариты для применения их на малых для этих методов частотах и обычно обладают всплесками пропускания в области непрозрачности. Для радиочастотных методов, использующих волноводные, полосковые и резонансные элементы, характерны возрастание энергетических потерь на поверхности проводящих элементов с ростом частоты, а также ряд проблем, связанных с трудностями прецизионного изготовления элементов устройств микрометровых размеров. Для высокочастотных устройств терагерцового диапазона существенное значение может иметь обеспечение возможности эффективного подавления интенсивной низкочастотной компоненты электромагнитного излучения, например, при изучении процессов переключения сверхвысокого быстродействия, характеризующихся широким

спектром частот и зависимостью интенсивности от частоты типа $1/f$.

Настоящая работа посвящена разработке и исследованию свойств малогабаритных высокочастотных фильтров, сочетающих оптические и волноводные элементы и предназначенных для решения задач фильтрации в широком диапазоне частот с.в.ч.–г.в.ч.-излучения. Фильтры позволяют обеспечить решение задач, требующих резкой границы отсечки при значительном и контролируемом подавлении мощного излучения вне полосы частот пропускания.

2. ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ ВОЗМОЖНОСТИ ФИЛЬТРАЦИИ ИЗЛУЧЕНИЯ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ЗАПРЕДЕЛЬНОГО ВОЛНОВОДА

Основной идеей данной работы является использование запердельного волновода с круглым отверстием в качестве высокочастотного фильтра, который не пропускает излучение с длиной волны, превышающей примерно два диаметра отверстия.

Свойства запердельных волноводов хорошо изучены [5–7]. Подавление длинноволновой части излучения в таком фильтре может быть весьма значительным. Другим важным достоинством запердельного волновода в качестве фильтра является резкость частотной границы полосы пропускания. При этом характеристики фильтров могут регулироваться в широких пределах изменением диаметров и длин волноводов.

Наиболее низкочастотной в цилиндрическом волноводе является мода волн H_{11} , определяющая границу отсечки фильтра. Соответствующая критическая длина волны $\lambda_{кр}$ составляет примерно $1.71d$, где d – диаметр волновода [5–7]. Амплитуда волны, распространяющейся в волноводе, может быть определена как

$$|\vec{E}|(Z) = |\vec{E}_0| \exp(i\gamma Z), \quad (1)$$

где Z – координата вдоль волновода; \vec{E} – напряженность электрического поля в точке Z ; E_0 – напряженность электрического поля в исходной точке; γ – постоянная распространения, описываемая в виде

$$\gamma = \frac{2\pi}{\lambda_{кр}} \sqrt{\left(\frac{\lambda_{кр}}{\lambda}\right)^2 - 1}. \quad (2)$$

Если $\lambda < \lambda_{кр}$, имеем обычную волну, распространяющуюся с амплитудой \vec{E}_0 в волноводе. Для волн с $\lambda > \lambda_{кр}$ величина γ становится мнимой. При этом показатель экспоненты $i\gamma Z$ становится отрицательной величиной, и волна экспоненциально затухает вдоль волновода.

Таким образом, отсекающие частотные свойства запердельного волновода описываются экспонентой, показатель которой линейно зависит от длины канала. Соответствующим подбором этой длины можно добиться сильного подавления низкочастотного излучения. Несложные оценки по формулам (1) и (2) показывают, что, например, при длине канала $Z \equiv L = 3\lambda_{кр}$ на частоте $0.99\omega_{кр}$ сигнал по амплитуде E ослабляется примерно в 14 раз (–23 дБ), а при частоте $0.96\omega_{кр}$ – уже почти в 200 раз (–46 дБ). При дальнейшем уменьшении частоты падающей волны фильтр оказывается практически непроницаемым. В этих условиях пропускание фильтрующего устройства может определяться прохождением излучения в обход запердельного волновода через щели и иными путями.

Затухание волны излучения, прошедшего фильтр, должно экспоненциально возрастать с увеличением длины канала фильтра. Это позволяет изменением длины канала фильтрующего устройства получать фильтры с разными предсказуемыми характеристиками подавления. При этом выражение (2) для частотной зависимости достаточно точно теоретически описывает пропускание фильтра в области сильного подавления. Вблизи же области прозрачности крутизна фильтра постепенно уменьшается с ростом частоты и начинает зависеть от множества других параметров, т.е. при определении характеристических параметров в этой области решающими являются данные экспериментальных исследований.

3. КОНСТРУКЦИЯ И ХАРАКТЕРНЫЕ ПАРАМЕТРЫ ФИЛЬТРУЮЩЕГО ЭЛЕМЕНТА НА ОСНОВЕ ЗАПРЕДЕЛЬНОГО ВОЛНОВОДА

При практическом применении запердельного волновода в качестве фильтра в терагерцовом диапазоне частот возникает ряд проблем, которые определяют особенности конфигурации и конструкции фильтра, а также технологию и методы его изготовления.

Первое обстоятельство связано с необходимостью перехода на фильтрующие каналы малого диаметра. Диаметр цилиндрического канала волновода в диапазоне частот фильтрации 0.1–3 ТГц должен составлять около половины длины волны, т.е. от 0.05 до 1.5 мм. Для подвода (отвода) излучения в этом частотном диапазоне становятся проблематичными изготовление и использование направляющих систем, имеющих близкий диаметр и соответствующие длины. Кроме того, при столь малых диаметрах и больших длинах могут наблюдаться значительные потери энергии излучения.

С целью уменьшения потерь в экспериментальных установках диаметр пучка обычно намного превышает длину волны излучения, дости-

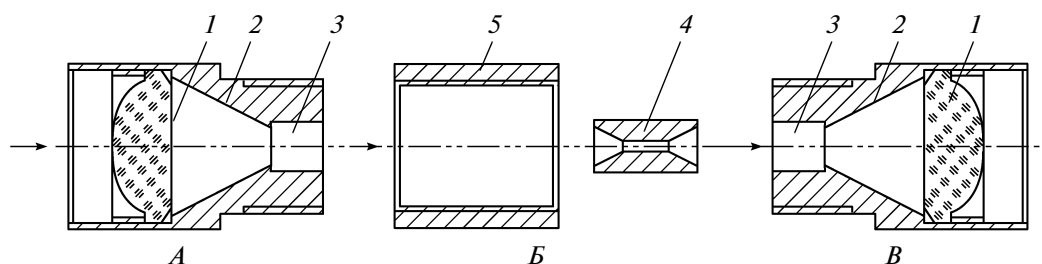


Рис. 1. Принципиальная схема конструкции фильтрующего модуля. *A* – оптико-волноводное устройство ввода излучения, *Б* – центральная металлическая часть модуля со сменным фильтрующим цилиндрическим каналом, *В* – оптико-волноводное устройство вывода излучения; 1 – полиэтиленовые линзы (диаметр 13 мм) для ввода излучения в фильтрующий канал и вывода из него, 2 – волноводные конусы (длина 8 мм, угол расходимости $\approx 30^\circ$), 3 – направляющие отверстия для втулки с запредельным волноводом, 4 – сменная металлическая втулка (внешний диаметр 4 мм) с цилиндрическим запредельным волноводом (диаметр канала: 1.5, 1.2, 0.48, 0.4, 0.24 мм) и продолжением волноводного конуса, 5 – металлическая муфта с резьбой для крепления устройств ввода/вывода фильтрующего модуля (длина 12 мм, внешний диаметр 14 мм).

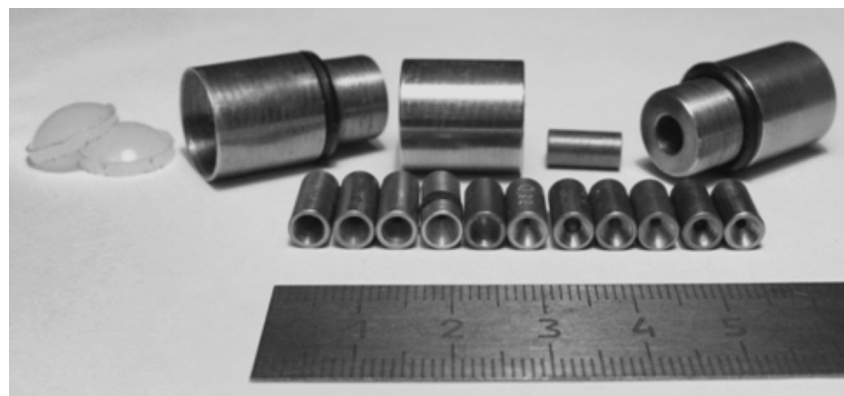


Рис. 2. Элементы конструкции фильтрующего модуля.

гая единиц или даже десятков сантиметров. При этом характеристики распространения излучения приближаются к характеристикам распространения в открытом пространстве. В этих условиях возникает проблема волнового согласования пучка излучения большого диаметра экспериментальной установки с отверстием фильтра существенно меньшего диаметра.

Первоначально делалась попытка решить эту проблему путем применения простых рупорных систем большого диаметра. Однако исследования показали, что относительно эффективные рупоры получаются лишь для частот < 100 ГГц. Для более высоких частот рупоры имели слишком большую длину, что оказалось сложным в изготовлении и приводило к большим потерям. Для решения проблемы было предложено использовать комбинированные волноводно-оптические системы с использованием оптических линз, фокусирующих излучение на отверстии фильтрующего волновода.

Принципиальная схема разработанной конструкции запредельного терагерцового фильтра

приведена на рис. 1, общий вид основных элементов конструкции фильтрующего модуля – на рис. 2. Основными элементами фильтра являются оптико-волноводные устройства ввода (вывода) излучения и центральная металлическая часть модуля со сменным фильтрующим цилиндрическим каналом. Важнейшими характеристиками фильтра являются уровень пропускания разрешенных частот и резкость частотной границы фильтра, определяемые резонансными явлениями, обусловленными неоднородностями системы, наличием границ канала, отражениями от линз и т.п. Затухание и монотонность характеристик, как показали измерения, оказались в сильной степени зависящими от конструкции элементов устройств ввода (вывода) излучения в канал волновода.

Поскольку для фильтров разных частот большая часть конструкции неизменна, сменной была сделана только фильтрующая часть системы. Простой сменный элемент включал собственно фильтрующий запредельный волновод с подобными сечением и длиной канала, а также ру-



Рис. 3. Спектр излучения и рабочая спектральная область л.о.в. ЛОВ-67 (340–440 ГГц).

поры на концах с входным диаметром 3 мм. Сменные элементы выполнены в виде латунных или медных цилиндров диаметром 5 мм и длиной 10–14 мм. Внешний диаметр фильтрующего модуля равен 15 мм.

Для опытных образцов использовались полиэтиленовые линзы диаметром 13.5 мм с фокусным расстоянием ~20 мм. Имелась возможность подстройки положения линз для обеспечения плоского фронта волны входящего и выходящего излучений с обеих внешних сторон фильтра, а также для согласования фильтрующего канала с пространством.

Для использованных линз диаметр пучка в фокусе по критерию Релея должен составлять не менее длины волны. В реальности из-за несовершенства изготовления линз диаметр пучка оказывался существенно больше и мог значительно превышать диаметр фильтрующего волновода. Для уменьшения потерь энергии при переходе пучка от линзы к волноводу в сменных элементах фильтра использованы рупорные системы малого диаметра, по максимальному диаметру примерно соответствующие диаметру фокального пятна линзы (3 мм) и плавно переходящие в диаметр отверстия основного канала фильтра. При этом длина и профиль рупора выбирались из условия

обеспечения заданного уровня отражения волн. Линзы вставлялись в направляющую систему в виде вспомогательных рупорных конусов с образующей, касательной по отношению к геометрическому ходу лучей линзы. Выходной диаметр конусов составлял 3 мм. Вспомогательные конусы оказывались эффективными при частотах до 200 ГГц и улучшали характеристики фильтров в основном в низкочастотной части частотного диапазона.

Описанная фильтрующая система предназначена для работы в различных условиях и при проведении измерений при низких температурах может вводиться в металлический цилиндрический волновод (диаметром 15 мм) измерительной криогенной установки.

4. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ХАРАКТЕРИСТИК ФИЛЬТРУЮЩИХ ЭЛЕМЕНТОВ НА ОСНОВЕ ЗАПРЕДЕЛЬНОГО ВОЛНОВОДА

Теоретическое рассмотрение свойств тракта, состоящего из системы металлических конусов и оптических линз, затруднено. Поэтому при оценке характеристик фильтров на основе запределного волновода и возможностей их использования в диапазоне субтерагерцовых и терагерцовых частот существенное значение имели экспериментальные исследования. Такие исследования проведены совместно с сотрудниками ИОФ РАН с использованием прецизионного монохроматического спектрометра “Эпсилон” на основе ламп обратной волны (л.о.в.) [8]. Характерный спектр излучения для одной из л.о.в. приведен на рис. 3.

Принципиальная схема экспериментальной установки на основе л.о.в.-спектрометра для экспериментальных тестовых измерений характеристик изготовленных субтерагерцовых и терагерцовых фильтров представлена на рис. 4. Установка содержит л.о.в.-генератор с блоком питания, квазиоптическую линию с набором коллиматорных полиэтиленовых линз, систему съемных аттенуаторов, модулятор и оптико-акустический детектор субмиллиметрового излучения GC-1P. Расстояние между линзами и держателем с образ-

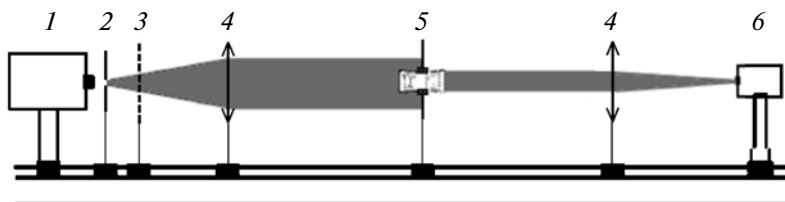


Рис. 4. Схема экспериментальной установки. 1 – л.о.в.-генератор, 2 – диафрагма-коллиматор (диаметр 2 мм), 3 – модулятор (частота 12 Гц), 4 – линзы (фокусное расстояние 120 мм, диаметр 13.5 мм), 5 – держатель фильтрующего модуля с фильтром и защитным экраном (диаметр 14 мм), 6 – оптико-акустический детектор GC-1P. Примерные расстояния между элементами установки: $L_{2-4} = 120$ мм, $L_{4-5} = 400$ мм, $L_{5-4} = 400$ мм, $L_{4-6} = 120$ мм.

Типы и частотные диапазоны генераторов, параметры и спектральные характеристики фильтров

Характеристики	Лампы обратной волны				
	ЛОВ-70		ЛОВ-67		ЛОВ-40
Диапазон частот, ГГц	110–180		330–550		560–720
Диаметр фильтрующего канала d , мм	1.5	1.2	0.48	0.4	0.24
Длина канала волновода L , мм	6.5	6.0	1.3	1.8	0.9
Граничная частота $F_{кр}$, ГГц;	116	>175	330	415	615
длина волны отсечки фильтра $\lambda_{кр}$, мкм	2580	1710	910	720	490
ΔF на уровне 10% и 80%, ГГц;	3	–	10	10	10
резкость частотной границы прозрачности, дБ/ГГц	1.5	1.2	0.3	0.3	0.25
Пропускание в области прозрачности	0.25	0.25*	0.4	0.3	0.3
Пропускание в области непрозрачности	$<10^{-5}$	$<10^{-5}$	$<10^{-4}$	$<10^{-5}$	$<10^{-2}$

* Величина параметра получена при измерении с помощью более высокочастотной лампы ЛОВ-67 (ОВ-32).

цом составляет 40–45 см, фокусное расстояние линз $4 \sim 12$ см.

Испытываемый фильтр устанавливался в пучке излучения между линзами. Конструкция фильтра монтировалась в плоском защитном металлическом экране большого диаметра с поглощающим покрытием. Тем самым уменьшалась вероятность прямого прохождения излучения к детектору в обход фильтрующего элемента. Поперечное сечение пучка ограничивалось диафрагмой с диаметром, меньшим диаметра защитного экрана. К сожалению, не было возможности использовать беззловую камеру, потому не исключалась вероятность попадания незначительного фона излучения на детектор за счет отражений рассеянного излучения от стен помещения.

Сигнал на выходе системы регистрировался методом синхронного детектирования с частотой модуляции 12.5 Гц. Большинство квазиоптических элементов с целью снижения роли интерференционных эффектов располагались под небольшим углом к поперечной плоскости оптической линии. Измерения амплитудно-частотных характеристик фильтров проводились путем сопоставления уровней излучения, регистрируемых детектором при введении в оптический тракт фильтрующего модуля и при его отсутствии. При этом защитный экран фильтра неизменно оставался в системе. С целью снижения роли интерференционных эффектов и улучшения однородности полей в поперечной плоскости перед л.о.в.-генератором помещалась дополнительная диафрагма (диаметром 2 мм). Это позволяло улучшить однородность пучка, снизить влияние обратной связи л.о.в.-генератора и других элементов схемы, а также уменьшить влияние полей отражения в помещении.

Испытания проводились в диапазоне частот 0.1–0.7 ТГц с помощью набора сменных цилиндрических волноводных фильтров с диаметрами фильтрующего канала 1.5, 1.2, 0.48, 0.4, 0.24 мм. Сменные фильтры размещались внутри согласующего модуля с внешним диаметром 15 мм и диаметром линз ~ 13.5 мм. Длина канала фильтров составляла $(2-3)\lambda_{кр}$. На рис. 5 представлены примеры экспериментально зарегистрированных спектров пропускания фильтрующих модулей на основе запердельных волноводов с указанными параметрами. Сплошной линией даны теоретические зависимости пропускания, рассчитанные по формулам (1) и (2). Данные соответствуют частотам в диапазонах л.о.в.: 110–170 ГГц (ЛОВ-70 (она же ОВ-86)), 350–550 ГГц (ЛОВ-67 (она же ОВ-32)) и 550–700 ГГц (ЛОВ-40 (она же ОВ-80)). Результаты измерений приведены также в таблице.

Согласно данным, приведенным на рис. 5 и в таблице, во всех диапазонах частот в спектральных характеристиках фильтров зарегистрировано наличие резкой границы пропускания. Спектральное положение границы с хорошей точностью соответствует рассчитанным значениям. Пропускание фильтров в области границы по уровню от 0.1 до 0.8 изменяется в интервале частот $\Delta f/f \approx 0.02-0.03$. При частотах выше граничной наблюдается область прозрачности с коэффициентом пропускания 0.3–0.4 по отношению к полной мощности излучения, падающего на входную линзу фильтра. С учетом неизбежных потерь это можно считать хорошим результатом. Снижение уровня пропускания в области прозрачности обусловлено рядом причин, среди которых можно отметить отражения в линзах, невозможность точной фокусировки в широком диапазоне частот, потери на конусах и элементах фильтрующего модуля, включая потери в фильтрующем волноводе. В данном случае показателен и информативен

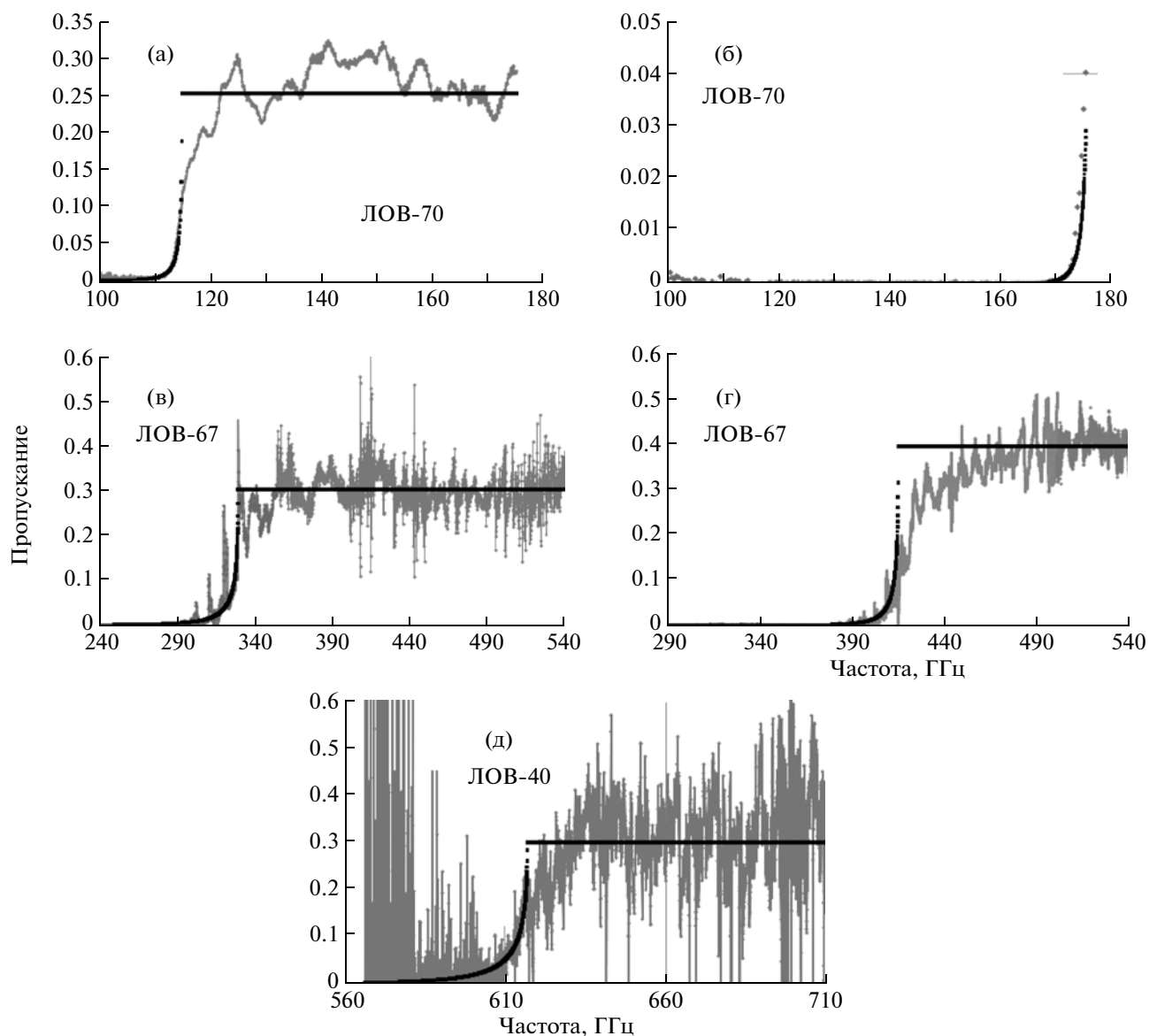


Рис. 5. Спектры пропускания фильтрующего модуля с различными диаметрами канала: 1.5 мм (а); 1.2 мм (б); 0.48 мм (в); 0.4 мм (г); 0.24 мм (малая мощность генератора) (д).

экспериментальный результат, согласно которому достигнутый в разработанных модулях уровень прозрачности обеспечивает возможность эффективного применения описываемых фильтров в диапазоне субтерагерцовых и терагерцовых частот.

Существенной особенностью измеренных спектров пропускания фильтрующих модулей, как видно из рис. 5, является заметный, далеко не монотонный их вид. Причем немонотонность зарегистрирована как в области низкоинтенсивной части спектра л.о.в., на краях их рабочего частотного диапазона, так и в области относительно интенсивного излучения в диапазоне прозрачности фильтров. Появление изрезанности и периодической структуры в спектрах пропускания фильтру-

ющих модулей можно объяснить несколькими причинами. Это и неоднородность потока излучения в тракте л.о.в.-спектрометра, и эффекты многократного отражения излучения между диафрагмами, элементами фильтрующего модуля и другими элементами в установке. Влияние этих факторов, с одной стороны, затрудняло проведение измерений, но с другой — оказалось несущественным, поскольку позволило зарегистрировать основные закономерности и параметры амплитудно-частотных характеристик измеренных фильтров, включая показатели резкости границы пропускания, уровня пропускания в области прозрачности и степени подавления излучения в области непрозрачности.

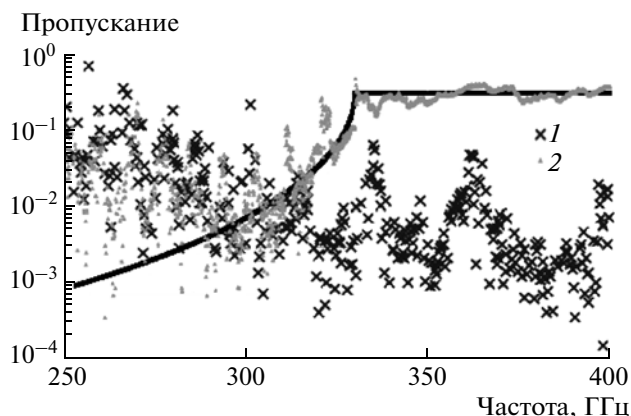


Рис. 6. Сравнение сигналов после фильтра с диаметром канала 0.48 мм при открытом (1) и полностью перекрытом отверстии детектора (2) (использовалась лампа ЛОВ-67). Сплошной кривой даны расчетные значения.

Наличие посторонних сигналов и шумов в области непропускания (отсечки) фильтров ограничивало определение истинного уровня подавления сигнала. Для всех фильтров величина подавления проверялась путем сравнения сигнала в области непропускания с сигналом при полном перекрытии входного отверстия фильтра непрозрачным экраном. В большинстве случаев перекрытие вообще не меняло наблюдаемую картину спектрограмм, что свидетельствовало о ничтожной роли излучения, просачивающегося непосредственно через фильтр. Результаты этих измерений позволяют утверждать, что уровень сигнала, прошедшего через фильтр в области непрозрачности, крайне мал и не превышает минимально различимого сигнала, регистрируемого при полном перекрытии отверстий фильтров.

Что касается шумов, определяемых нестабильностью генератора и шумами детектора излучения, то эти шумы хорошо регистрировались при малой мощности генератора. При увеличении мощности излучения л.о.в. там, где это было возможно, влияние помех уменьшалось, но не исчезало (рис. 6), что, видимо, объясняется наличием помех, обусловленных разного рода отражениями в измерительной установке. Наличие шумов в области пропускания также можно объяснять как недостаточной мощностью генератора установки, так и отражениями от различных элементов в установке. Вместе с тем, на сигнале также явно просматриваются следы периодических осцилляций уровня сигнала в области пропускания фильтра, величина которых может достигать до 20% от средней величины.

Предполагается, что появление осцилляций может быть следствием резонансных процессов в канале фильтра и, в принципе, может быть уменьшено оптимизацией входных конусов — трансфор-

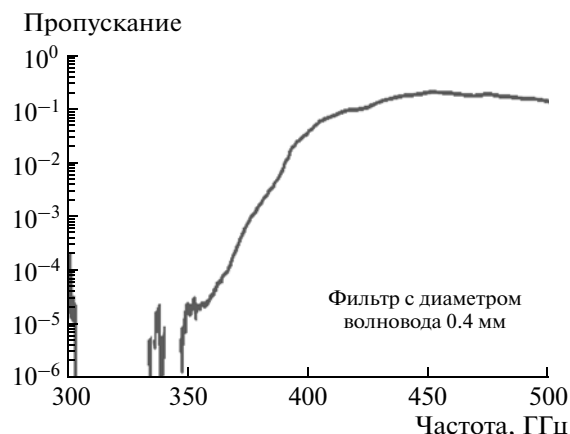


Рис. 7. Участок усредненной экспериментальной зависимости пропускания в области непрозрачности фильтра с диаметром волновода 0.4 мм.

маторов основного канала. На рис. 7 представлена усредненная характеристика пропускания фильтра с диаметром волновода 0.4 мм. Усреднение по нескольким точкам частотного интервала, как видно, приводит к сглаживанию кривой пропускания. Обработка с усреднением позволяет выявить средний уровень пропускания фильтра, который в области отсечки оказывается порядка $0.1-5 \cdot 10^{-5}$ (т.е. порядка $-(43-60)$ дБ). Применение более мощных источников терагерцового излучения могло бы увеличить точность измерения данной величины и, возможно, выявить некоторые отклонения пропускания фильтра в области отсечки от теоретической зависимости, однако на данном этапе сделать это не удалось.

Подводя итоги, можно констатировать, что в проведенных измерениях экспериментально подтверждено подавление сигнала в области отсечки до уровня менее $0.1-5 \cdot 10^{-5}$ (рис. 7) от мощности сигнала уровня пропускания. Причем, исходя из теории, можно предполагать, что величина подавления фильтра должна быть еще выше. К сожалению, установить реальные значения подавления из-за ограничений, связанных с экспериментальной установкой, не представилось возможным.

5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Разработано устройство эффективной фильтрации электромагнитного излучения терагерцового и субтерагерцового диапазонов, основанное на свойствах частотной избирательности запредельного волновода, использующего оптические и волноводные методы согласования с окружающей средой.

2. Проведены расчетные оценки частоты фильтрации и крутизны частотной характеристики фильтров.

3. Изготовлены образцы устройства для фильтрации излучения в области частот 0.1–3 ТГц, имеющие малые габариты и пригодные для использования в широком диапазоне температур.

4. Проведены экспериментальные испытания амплитудно-частотных характеристик образцов фильтров в диапазоне 100–700 ГГц. В целом, данные измерений соответствуют теоретически рассчитанным значениям. При этом параметры фильтров не являются предельными и в случае необходимости могут быть изменены путем варьирования размеров канала фильтра как самого волновода, так и фильтрующего модуля в целом.

5. Показано, что фильтры обеспечивают резкую границу полосы пропускания при эффективном подавлении излучения вне полосы пропускания. Изменение пропускания на частотном участке $\Delta f/f \approx 0.02$ – 0.03 составило от 0.1 до 0.8. Прозрачность фильтра в области пропускания находилась на уровне 30–40%.

6. Экспериментально подтверждено подавление сигнала в области отсечки фильтров до уровня менее 0.1 – $5 \cdot 10^{-5}$ (–(43–60) дБ) от мощности сигнала уровня пропускания. Максимальное подавление сигнала фильтрами может быть больше. Истинный уровень максимального подавления фильтров в области отсечки выявить не удалось, поскольку полученные значения сигналов ограничивались шумами и помехами установки.

Представленные принцип построения и конструкция фильтров на основе запредельного волновода позволяют рекомендовать эти фильтры как простые и эффективные устройства для решения широкого спектра задач фильтрации в с.в.ч.-, к.в.ч- и г.в.ч.-диапазонах. Авторами изготовлены образцы фильтров с частотной границей выше 800 ГГц. Планируется проведение испытаний на более высоких частотах с использованием высо-

кочастотных фильтров, имеющих границу отсечки до 3 ТГц.

Авторы выражают благодарность заведующему лабораторией экспериментальных методов субмиллиметровой спектроскопии ИОФ РАН И.Е. Спектору за полезные обсуждения и поддержку в проведении экспериментальных исследований.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки РФ, РФФИ (11-02-01182, 09-02-12438), Программы Президиума РАН “Основы фундаментальных исследований нанотехнологий и наноматериалов”, Программ фундаментальных исследований ОФН РАН “Современные проблемы радиофизики” (IV.12) и “Физические и технологические исследования полупроводниковых лазеров, направленные на достижение предельных параметров” (III.7).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Withayachumnankul W., Png G., Yin X. et al.* // Proc. of the IEEE. 2008. V. 95. № 8. P. 1528.
2. *Валитов Р.А., Дюбко С.Ф., Камышан В.В.* Техника субмиллиметровых волн. Сб. статей. М.: Советское радио, 1969.
3. *Kropotov G.I., Tsygankova E.V.* // Vestnik Novosibirsk State University. Series: Physics. 2010. V. 5. Issue 4. P. 113.
4. *Аржанников А.В., Кузнецов С.А., Сеницкий С.Л.* // ЖТФ. 2002. Т. 72. Вып. 9. С. 102.
5. *Лебедев И.В.* Техника и приборы СВЧ. М.: Высшая школа, 1970.
6. *Голубев В.И., Ковалев И.С., Кузнецов Е.Г.* Конструирование и расчет полосковых устройств. М.: Советское радио, 1974.
7. *Карманенко С.Ф., Семенов А.А.* // ЖТФ. 2000. Т. 26. Вып. 3. С. 12.
8. *Волков А.А., Гончаров Ю.Г., Козлов Г.В. и др.* // ПТЭ. 1984. № 2. С. 236.