

ОБЩАЯ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ  
ТЕХНИКА

УДК 535-14

ТЕРАГЕРЦЕВЫЕ УСТРОЙСТВА

©2026 г. Г. И. Кропотов <sup>а</sup>, Д. А. Попов <sup>а</sup>, Д. И. Цыпишка <sup>а,\*</sup>

<sup>а</sup> Общество с ограниченной ответственностью “ТИДЕКС”

Россия, 194292, Санкт-Петербург, ул. Домостроительная, 16

\*e-mail: dmitrytsypishka@yandex.ru

Поступила в редакцию 22.07.2025 г.

После доработки 23.07.2025 г.

Принята к публикации 15.09.2025 г.

Приведены результаты разработки терагерцевых пассивных устройств для различных приложений. Обсуждаются основные принципы разработки, технологии изготовления, а также технические характеристики разработанных устройств. Рассматриваются возможности применения пассивных устройств в различных терагерцевых системах.

1. ВВЕДЕНИЕ

Терагерцевые (ТГц) приборы в настоящее время успешно применяются в различных областях науки и в медицине, они становятся неотъемлемой частью в промышленных приложениях, а также в системах связи, безопасности, измерительной технике. Наряду с активными приборами генерации и управления ТГц-излучением, практическое применение находят и специальные пассивные устройства, которые позволяют использовать возможности ТГц-излучения в исследовательских и прикладных задачах. К таким устройствам относятся дифракционные решетки, аттенюаторы, объективы, расширители пучков и т.п. Конструкции и принципы работы таких устройств имеют специфические особенности, что отличает их от аналогичных устройств для других диапазонов частот.

2. ДИФРАКЦИОННЫЕ ТГц-РЕШЕТКИ

Дифракционные ТГц-решетки предназначены для проведения спектральных измерений в ТГц-диапазоне. Различают пропускающие (прозрачные) и отражательные дифракционные решетки. Дифракционные ТГц-решетки могут применяться в следующих сферах:

- ТГц-спектроскопия,
- приборы ТГц-диагностики,

- электрооптические установки,
- астрономия и астрофизика,
- исследования свойств вещества.

Компания ТИДЕКС изготавливает рельефно-фазовые решетки [1], работающие на пропускание, которые позволяют получить максимальную концентрацию энергии дифрагированного излучения в определенном порядке спектра. Периодическая структура таких решеток создается путем нарезания параллельных штрихов – канавок треугольного профиля на прозрачной подложке. В качестве подложек используются прозрачные в ТГц-диапазоне материалы, такие как TRX (полиметилпентен) и ZEONEX (циклоолефиновый полимер).

Решетки изготавливаются в четырех перекрывающихся полосах пропускания, лежащих в диапазоне от 0.28 до 3.12 ТГц: 0.28–0.55 ТГц, 0.49–0.98 ТГц, 0.87–1.75 ТГц, 1.56–3.12 ТГц. Выбор рабочих диапазонов решеток обусловлен условием получения для них оптимальных характеристик (угловой дисперсии и разрешающей способности), а также технологическими возможностями изготовления такого типа решеток.

Расчеты параметров решеток, интенсивностей дифрагированных волн и положений максимумов первого порядка для отдельных монохроматических волн выполнялись в рамках приближения Фраунгофера. Для проверки работы и сравнения расчетных и экспериментальных данных были проведены измерения характеристик решеток в различных оптических схемах с разными генераторами ТГц-излучения. Источниками излучения являлись СЛОН, субмиллиметровый лазер на парах метанола с оптической накачкой перестраиваемым CO<sub>2</sub>-лазером (в СПБГТУ), и лазер на свободных электронах FEL (в Сибирском центре синхротронного ТГц-излучения в ИЯФ СО РАН). На рис. 1 представлен график зависимости интенсивности монохроматической волны с  $\lambda = 118$  мкм от угла дифракции для решеток из TRX с периодом  $d = 250$  мкм, где в качестве источника излучения применялся СЛОН. На рис. 2 представлен график зависимости интенсивности монохроматической волны с  $\lambda = 141$  мкм от угла дифракции для той же решетки с использованием FEL. Во втором случае при измерениях между решеткой и детектором излучения устанавливалась собирающая линза. При сравнении этих графиков видно, что в первом случае линии максимумов нулевого и первого порядков шире, чем в схеме с линзой. Это связано с тем, что собирающая линза фокусирует лучи, идущие параллельно. Полученные данные должны быть учтены пользователями при подготовке экспериментов в зависимости от поставленных задач: в случае, когда решетка используется для изучения источников излучения (мощность, форма пучка, распределение энергии и т.д.), линзу в

экспериментах можно не применять, а когда ставится задача разрешения спектральных линий, необходимо использование линзы.

**Рис. 1.** Зависимость интенсивности дифрагированной монохроматической волны  $\lambda = 118$  мкм от угла дифракции для дифракционных решеток из ТРХ с периодом  $d = 250$  мкм.

**Рис. 2.** Зависимость интенсивности дифрагированной монохроматической волны  $\lambda = 141$  мкм от угла дифракции для дифракционной решетки из ТРХ ...

Для дифракционной решетки конкретного диапазона полосы пропускания, который определяется с учетом критерия Рэлея, интенсивность дифрагированных монохроматических волн зависит от длины волны: она максимальна в середине диапазона и убывает по мере приближения к краям. Например, для дифракционной решетки из ТРХ с периодом 250 мкм (диапазон пропускания 1.56 – 3.12 ТГц или 96–192 мкм) для монохроматической волны с  $\lambda = 141$  мкм (середина рабочего диапазона решетки) интенсивность в максимумах первого порядка в несколько раз больше, чем для монохроматической волны с  $\lambda = 118$  мкм (ближе к краю диапазона). Это соответствует теоретическим расчетам интенсивности дифрагированных волн и положения максимумов первого порядка для отдельных монохроматических волн в рамках приближения Фраунгофера. Поскольку при тестировании решеток были использованы разные источники излучения и оптические схемы, значения интенсивностей на графиках выражены в относительных единицах.

Измерения рельефно-фазовых ТГц-решеток показывают наличие у них высокой светосилы и разрешения рабочих максимумов. Это позволяет с успехом использовать такие решетки при анализе спектров источников излучения, в том числе малой мощности, что является немаловажным для исследований в ТГц-диапазоне.

### 3. ТГц-АТТЕНЮАТОРЫ

Аттенюаторы предназначены для ослабления мощного ТГц-излучения. Они применяются в системах ТГц-спектроскопии, метрологии, высокочастотной связи и визуализации для регулирования интенсивности излучения в широком диапазоне частот, обеспечивая при этом сохранение временной формы импульсов и предотвращение спектральных искажений.

Компания ТИДЕКС производит устройства, состоящие из четырех вмонтированных в кассетный держатель ТГц-аттенюаторов с различными уровнями ослабления (рис. 3) [1]. Держатель представляет собой конструкцию из пяти соединенных кольцевых оправ. Каждый из четырех аттенюаторов вставлен в оправу, одна оправа оставлена пустой. В пустую оправу можно установить другой элемент, например отрезающий или полосовой фильтр.

**Рис. 3.** Устройство из четырех аттенюаторов с различным уровнем ослабления.

ТГц-аттенюаторы представляют собой клиновидные кремниевые пластины, покрытые тонкой металлической пленкой из хрома. Пропускание аттенюаторов составляет 30%, 10%, 3% и 1%. Спектры таких аттенюаторов представлены на рис. 4. Рабочий диапазон аттенюаторов 40–3000 мкм и более (в соответствии со спектром пропускания высокоомного кремния HRFZ-Si) [2]. Их можно использовать как по отдельности, так и в комбинации, что позволяет получать различные уровни ослабления.

**Рис. 4.** Спектры пропускания ТГц аттенюаторов.

#### 4. ПЕРЕСТРАИВАЕМЫЙ ПРЕЦИЗИОННЫЙ ТГЦ-АТТЕНЮАТОР

Перестраиваемые прецизионные ТГц-аттенюаторы применяются для точного регулирования интенсивности излучения в широком диапазоне частот. В отличие от аттенюаторов с постоянным уровнем ослабления, изготовленных из кремниевых пластин, перестраиваемый аттенюатор представляет собой модуль из двух проволочных или пленочных поляризаторов, устанавливаемых последовательно друг за другом [3]. Поляризаторы устанавливаются в ротаторы, обеспечивающие вращение на  $360^\circ$  и закрепленные на едином основании. Первый поляризатор на пути излучения называется задающим поляризатором, а второй – анализатором. Регулирование степени ослабления интенсивности ТГц-излучения, а также направления его линейной поляризации осуществляется путем изменения угла между осями задающего поляризатора и анализатора.

Достоинство перестраиваемого прецизионного аттенюатора заключается в возможности плавного изменения и точной установки требуемого ослабления вплоть до 30–40 дБ. В конструкции предусмотрена возможность отклонения плоскости поляризаторов от параллельного расположения для уменьшения эффекта переотражения и интерференции.

В зависимости от рабочего диапазона длин волн предлагаются следующие типы аттенюаторов [4]:

- для длин волн от 600 мкм и более – аттенюатор для микроволнового излучения,
- для длин волн от 150 мкм и более – аттенюатор для ТГц-излучения,
- для длин волн от 15 мкм – аттенюатор для ИК-ТГц-излучения.

На рис. 5 представлена зависимость пропускания аттенюатора второго типа от угла ориентации анализатора относительно задающего поляризатора, измеренная на непрерывном источнике с  $f = 140$  ГГц ( $\lambda = 2143$  мкм).

**Рис. 5.** Зависимость пропускания аттенюатора от угла ориентации анализатора относительно задающего поляризатора...

На рис. 6 представлена спектральная калибровочная характеристика для различных углов ориентации анализатора.

**Рис. 6.** Типичная спектральная калибровочная характеристика аттенюатора для различных углов ориентации анализатора, измеренная на импульсном ТГц-спектрометре

## 5. ТГц-ОБЪЕКТИВЫ

Терагерцевые объективы линз применяются для получения высококачественного изображения при решении задач визуализации в ТГц-диапазоне. Компания ТИДЕКС разработала два типа объективов, предназначенных для работы в диапазоне 4.25–0.094 ТГц (70–3189 мкм) с сенсором – матрицей неохлаждаемых микроболометров с соотношением сторон  $4 \times 3$  и диагональю 10.4 мм [1]. В качестве материала линз используется высокоомный кремний HRFZ-Si. Расчет структурной схемы объективов выполнен на основе методики расчета тепловизионного объектива [5].

**Таблица 1.** Характеристики ТГц-объективов

Параметры	Тип объектива	
	44/0.95	44/0.7
Фокусное расстояние, мм	44	
Рабочий диапазон, мкм	50–8000 (6 ТГц – 37 ТГц)	
Диафрагменное число	44/0.95	44/0.7
Расстояние до объекта, см	$\geq 90$	$\geq 60$
Размеры (чистая апертура/диаметр $\times$ длина), мм <sup>2</sup>	$\varnothing 57/\varnothing 90 \times 74.5$	$\varnothing 71/\varnothing 105 \times 74.5$

Тестирование объективов осуществлялось при помощи матрицы микроболометров с разрешением  $320 \times 240$  пикселей (шаг пикселя составляет 23.5 мкм) в диапазоне 150–300 мкм по схеме, представленной на рис. 7.

**Рис. 7.** Схема эксперимента по тестированию ТГц-объективов

Широкополосное (150–3000 мкм) ТГц-излучение генерируется в кристалле ZnTe толщиной 0.5 мм методом оптической ректификации при помощи фемтосекундного лазера с длиной волны 780 нм и длительностью импульса 25 фс. Ширина пучка накачки (FWHM) составляет 6 мм, ширина пучка ТГц-излучения в  $\sqrt{2}$  раз меньше, т.е. составляет 4.2 мм. На расстоянии  $L$  от кристалла соосно расположен ТГц-объектив, за ним на расстоянии  $f$  расположена ТГц-камера. Матрица ТГц-камеры находится на расстоянии 12.9 мм от входного торца. Матрица ТГц-камеры чувствительна в диапазоне от 30 до 300 мкм. На рис. 8 представлены профили перетяжки ТГц-пучка при  $L = 200$  мм,  $f = 15$  мм и  $k = 0.95$  (число  $k$

определяется как  $F / D$ , где  $F$  – заднее фокусное расстояние, а  $D$  – диаметр входного зрачка объектива). Ширина перетяжки составила 260 мкм.

**Рис. 8.** Перетяжка ТГц пучка: **а** – снимок ТГц-пучка излучения, **б** – зависимость сигнала от номера пикселя в строке матрицы.

Результаты эксперимента подтверждают правильность работы объектива.

## 6. ТГц-РАСШИРИТЕЛИ ПУЧКА

Терагерцевые расширители пучка предназначены для увеличения или уменьшения диаметра параллельных ТГц-пучков. Внешний вид расширителя представлен на рис. 9. Двухлинзовые ТГц-расширители выполнены по схеме Галилея, они обеспечивают работу с низким уровнем aberrаций. Они являются дифракционно-ограниченными системами, снижающими влияние расходимости расширяемого пучка. Расширение пучка позволяет сфокусировать ТГц-излучение в дифракционно-ограниченное фокальное пятно. Таким образом можно получить наибольшую плотность мощности в системе.

**Рис. 9.** ТГц-расширитель пучка.

Терагерцевые расширители пучка могут использоваться как с непрерывными, так и с импульсными источниками излучения. Данные расширители обладают большими входными и выходными апертурами, что позволяет использовать их с различными входными диаметрами пучков.

Под требуемый диапазон работы на линзы расширителя может наноситься ТГц-просветляющее покрытие.

Компания ТИДЕКС изготавливает расширители с коэффициентами расширения (сжатия):  $\times 2$ ,  $\times 5$  и  $\times 10$  [1]. Для расчета расширения использовалась программа для компьютерного моделирования оптических систем Zemax. Основные параметры этих расширителей представлены в табл. 2.

**Таблица 2.** Основные параметры ТГц-расширителей

Коэффициенты расширения (сжатия)	$\times 2$	$\times 5$	$\times 10$
Материал линз	HRFZ-Si		
Диапазон работы, мкм	50–8000 (6 ТГц–37 ГГц)		
Максимальный диаметр входного пучка, мм	72	28.8	14.4
Общее пропускание*		65%	
Искажение волнового фронта @50 мкм	0.03 $\lambda$	0.06 $\lambda$	0.04 $\lambda$
Габаритные размеры, мм <sup>3</sup>	156×156×186	166×154×203	166×154×257

*Примечание.* Звездочкой отмечено пропускание при двустороннем просветляющем покрытием на обеих линзах.

На рис. 10 представлена экспериментальная схема тестирования ТГц-расширителей. В качестве источника ТГц-излучения используется ферритовый циркулятор, излучающий на частоте 100 ГГц ( $\lambda = 3$  мм). В качестве приемника излучения используется ТГц-камера MICROXСАМ-384I-THZ производства INO с объективом производства ООО “ТИДЕКС” ( $f/0.7$ ). Источник генерирует параллельный пучок диаметром 10 мм (рис. 11а). Диаметр пучка измерен по уровню  $1/e^2$ . Камера регистрирует изображение, получаемое без расширителя и с расширителем.

**Рис. 10.** Экспериментальная схема тестирования ТГц расширителей.

Результаты тестирования расширителя с коэффициентом расширения  $\times 2$  приведены на рис. 11. Из полученных результатов следует, что расширитель увеличивает диаметр пучка в два раза.

**Рис.11. а** – Изображение пучка без расширителя, **б** – изображение пучка, прошедшего расширитель.

Для повышения общего пропускания линзы ТГц-расширителя также могут быть изготовлены из ТРХ.

## 7. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Ограничение применения ТГц-излучения в науке и особенно в приложениях, используемых в медицине, промышленности и системах безопасности, до недавнего времени было связано с отсутствием недорогих оптических компонент и устройств. Рассмотренные в данной работе устройства позволяют решить различные задачи, связанные с применением ТГц-излучения. Эти устройства относительно недороги и надежны при работе с практически любыми источниками ТГц-излучения, они обеспечивают высокие технические характеристики приборов и систем, в которых применяются.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. <https://www.tydexoptics.com/ru/products/tgc-ustrojstva/>
2. Рогалин В.Е., Каплунов И.А., Кропотов Г.И. // Оптика и спектроскопия. 2018. Т. 125. № 6. С. 851. <http://doi.org/10.21883/OS.2018.12.46951.190-18>
3. Kaltenecker K.J., Kelleher E., Zhou B., Jepsen P.U. // J. Infrared, Millimeter, Terahertz Waves. 2019. V. 40. № 8. P. 878. <http://doi.org/10.1007/s10762-019-00608-x>

4. [https://www.tydexoptics.com/ru/products/tgc-ustrojstva/thz\\_tunable\\_precision\\_attenuator/](https://www.tydexoptics.com/ru/products/tgc-ustrojstva/thz_tunable_precision_attenuator/) .
5. *Бодров С.В.* // Наука и образование: научное издание МГТУ им. Н.Э. Баумана. 2012. № 6. С.311. <http://doi.org/10.7463/0612.0445463>

## ПОДПИСИ К РИСУНКАМ

- Рис. 1.** Зависимость интенсивности дифрагированной монохроматической волны с  $\lambda = 118$  мкм от угла дифракции для дифракционных решеток из ТРХ с периодом  $d = 250$  мкм. Источник излучения – субмиллиметровый лазер с оптической накачкой.
- Рис. 2.** Зависимость интенсивности дифрагированной монохроматической волны с  $\lambda = 141$  мкм от угла дифракции для дифракционной решетки из ТРХ с периодом  $d = 250$  мкм. Источник излучения – лазер на свободных электронах. При регистрации сигнала применялась собирающая ТРХ-линза
- Рис. 3.** Устройство из четырех аттенюаторов с различными уровнями ослабления.
- Рис. 4.** Спектры пропускания ТГц-аттенюаторов.
- Рис. 5.** Зависимость пропускания аттенюатора от угла ориентации анализатора относительно задающего поляризатора, измеренная на непрерывном источнике с  $f = 140$  ГГц ( $\lambda = 2143$  мкм).
- Рис. 6.** Типичная спектральная калибровочная характеристика аттенюатора для различных углов ориентации анализатора, измеренная на импульсном ТГц-спектрометре Menlo Systems K-8.
- Рис. 7.** Схема эксперимента по тестированию ТГц-объективов.
- Рис. 8.** Перетяжка ТГц-пучка: **а** – снимок ТГц-пучка излучения, **б** – зависимость сигнала от номера пикселя в строке матрицы.
- Рис. 9.** ТГц-расширитель пучка.
- Рис. 10.** Экспериментальная схема тестирования ТГц-расширителей.
- Рис. 11.** **а** – Изображение пучка без расширителя. **б** – Изображение пучка, прошедшего расширитель.

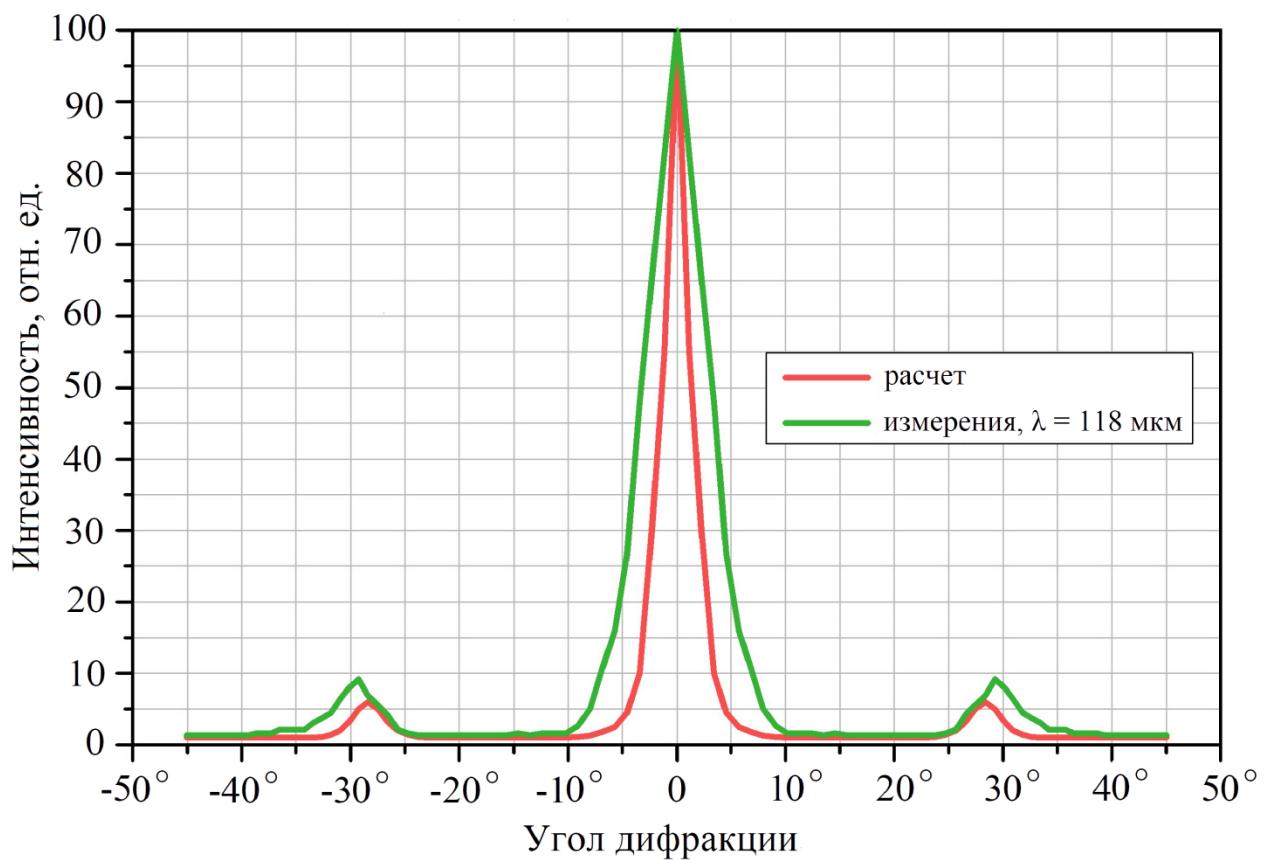
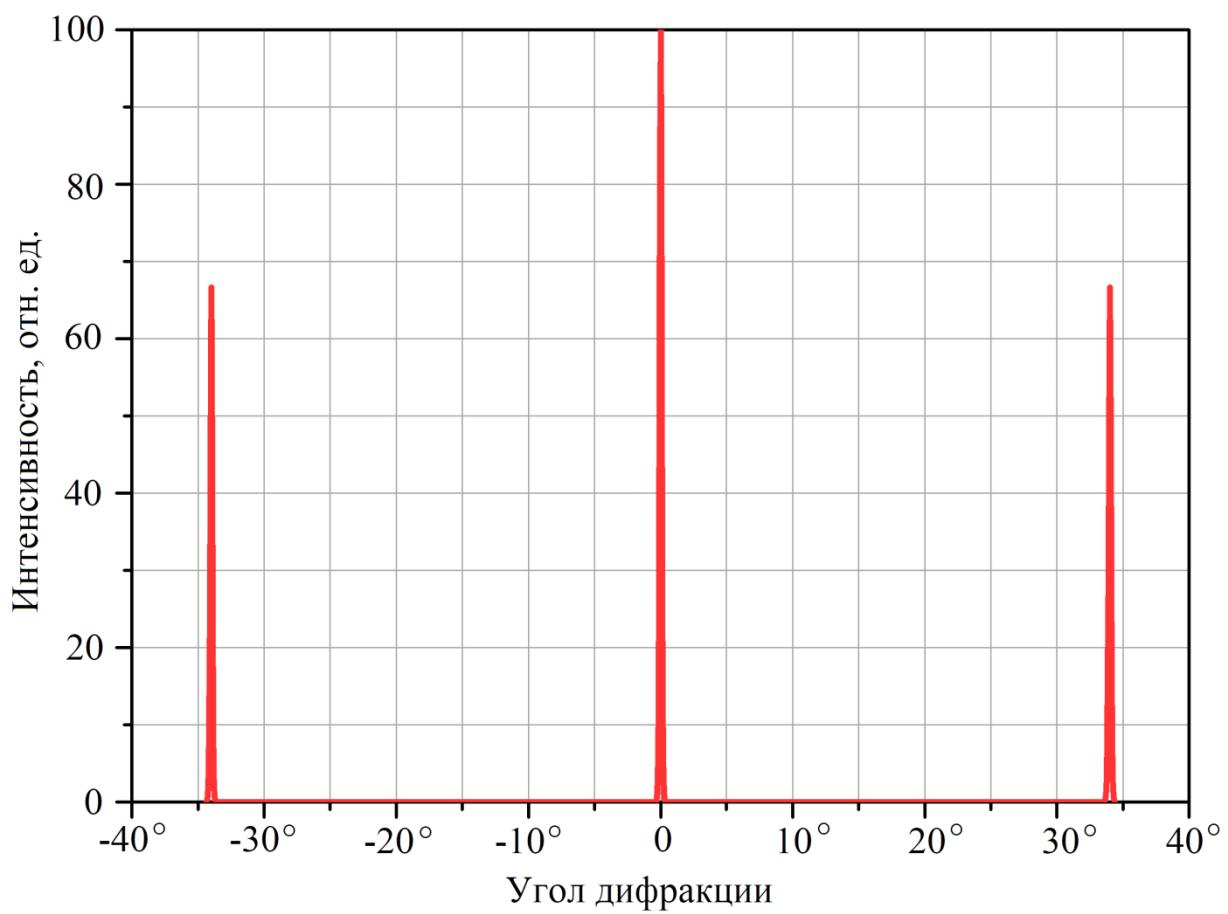
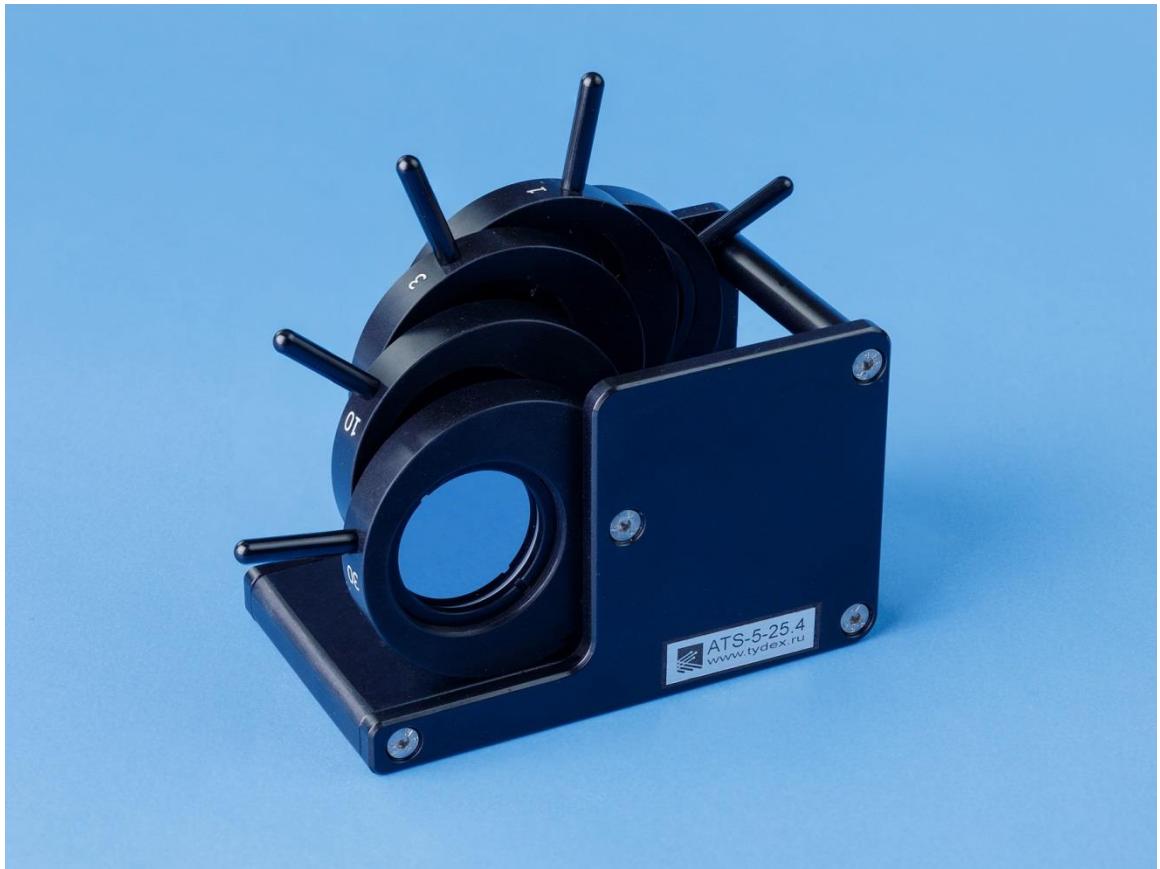


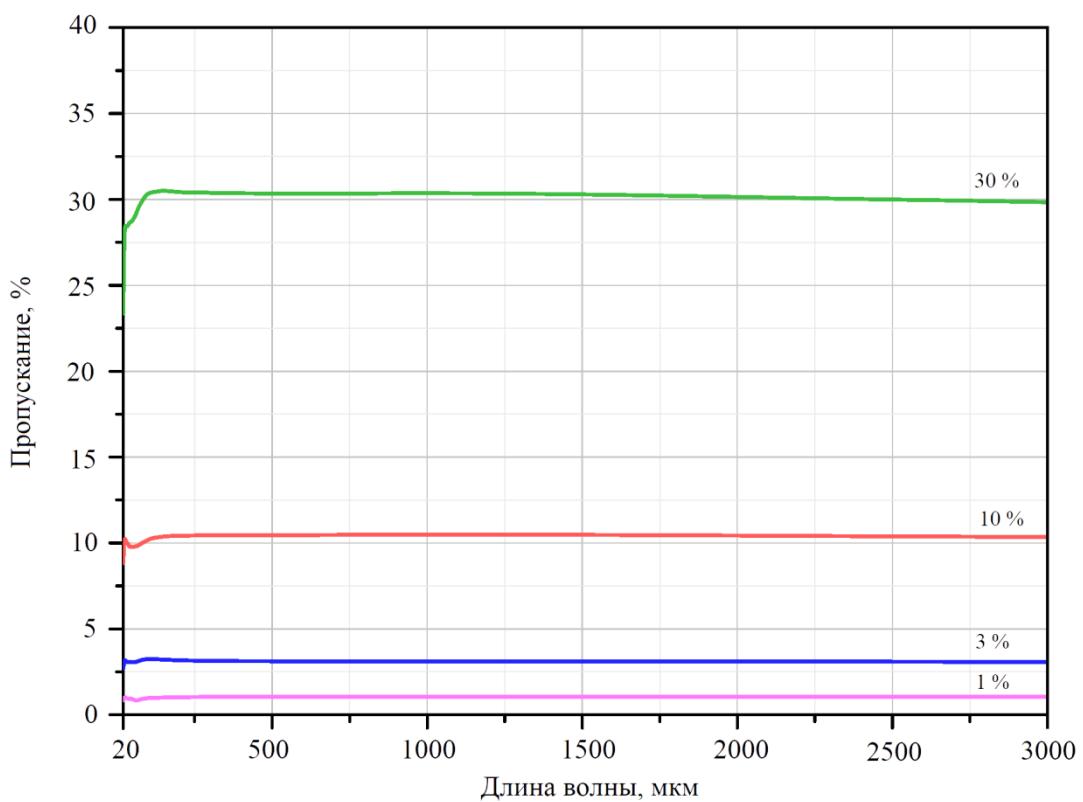
Рис. 1



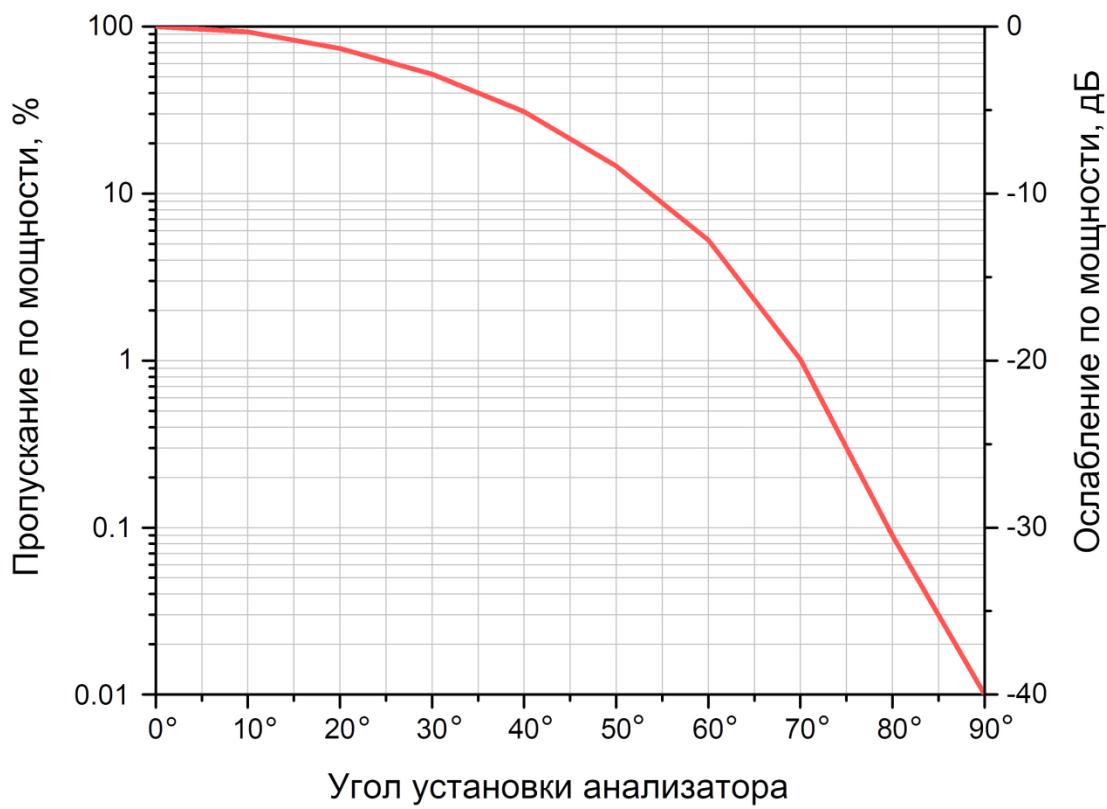
**Рис. 2**



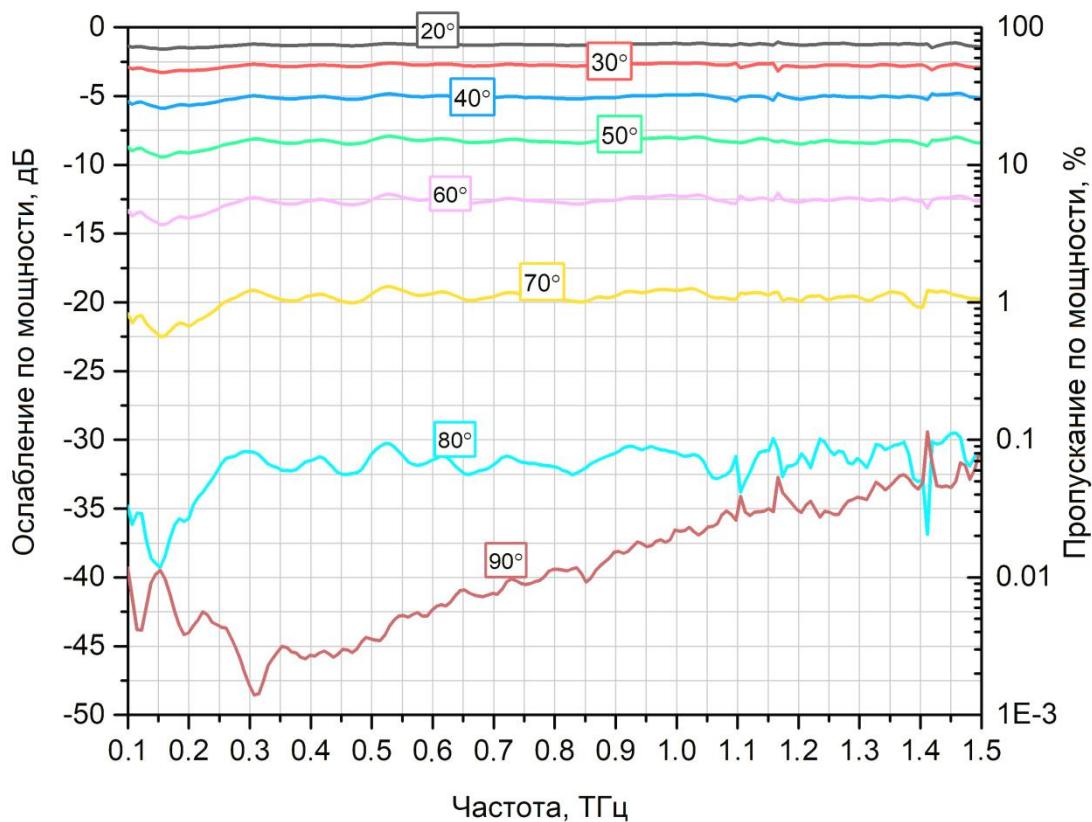
**Рис. 3**



**Рис. 4**



**Рис. 5**



**Рис. 6**

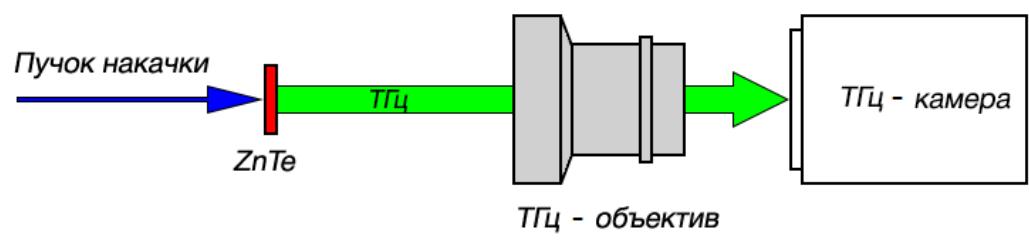
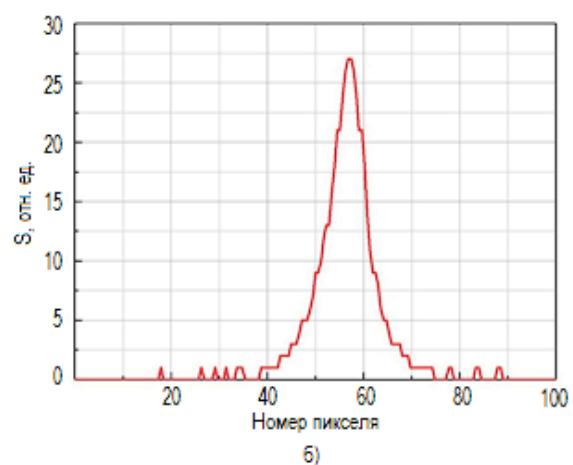
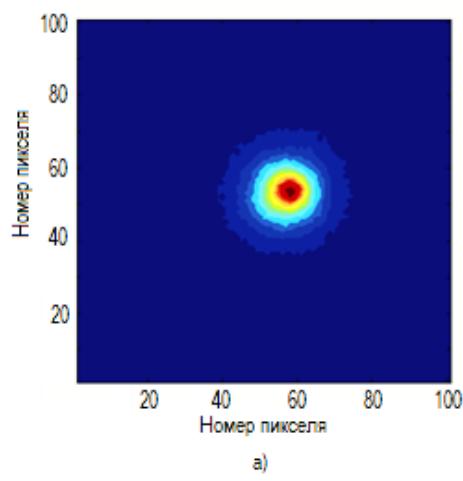
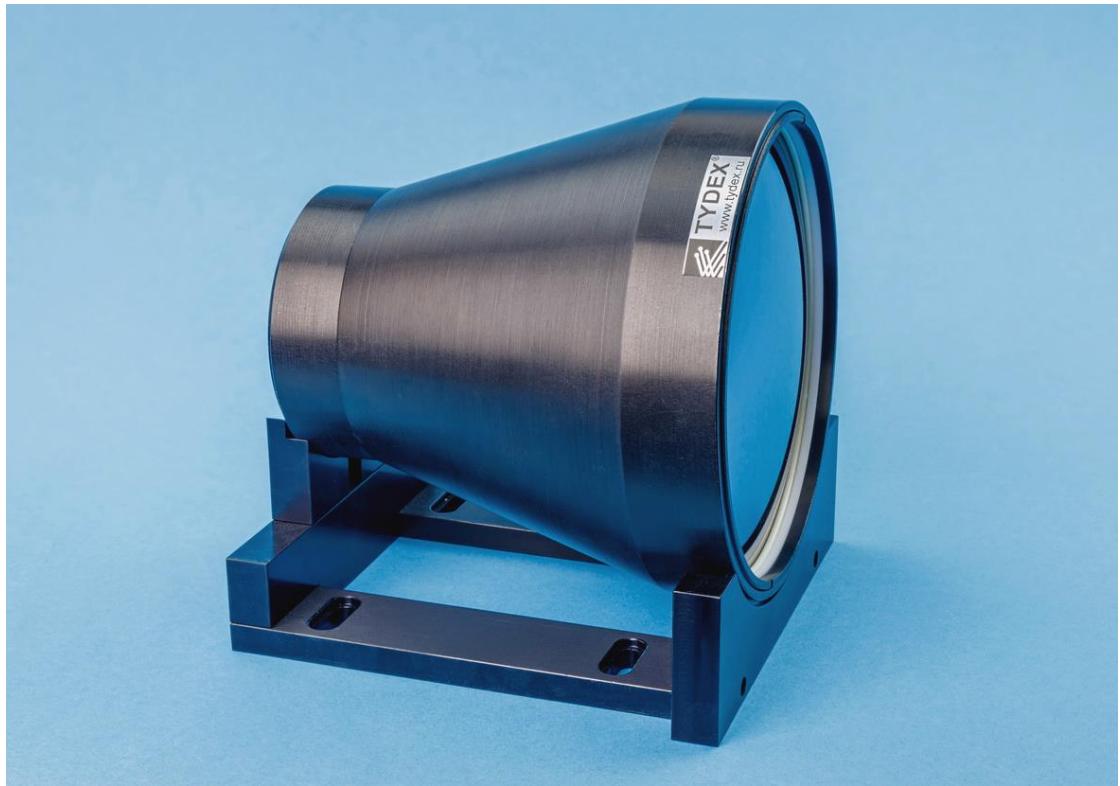


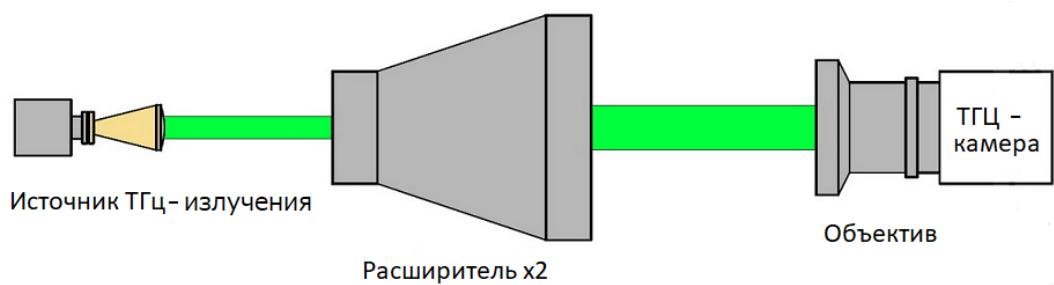
Рис. 7



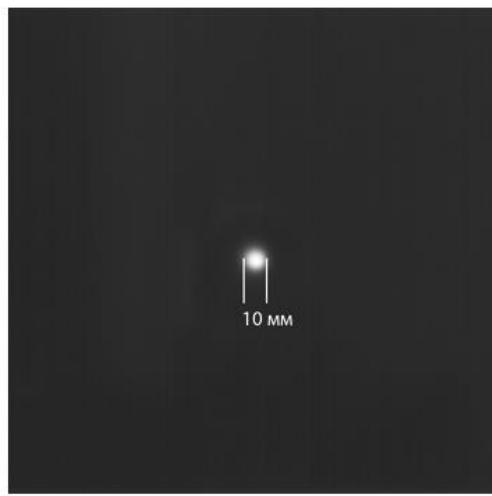
**Рис. 8**



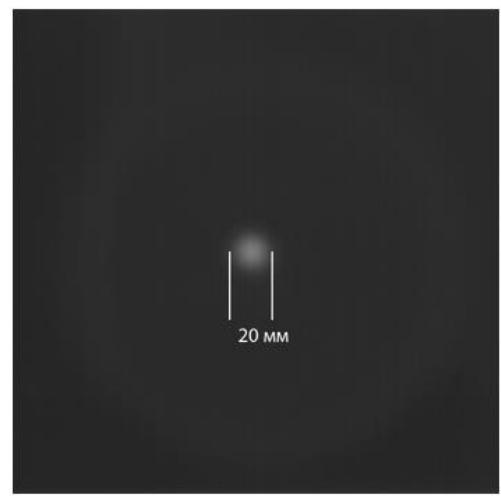
**Рис. 9**



**Рис. 10**



a)



б)

**Рис. 11**