

**ОБЩАЯ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ
ТЕХНИКА**

УДК 535-14

ТЕРАГЕРЦЕВЫЕ УСТРОЙСТВА

©2026 г. Г. И. Кропотов ^а, Д. А. Попов ^а, Д. И. Цыпишка ^{а,*}

^а Общество с ограниченной ответственностью “ТИДЕКС”

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

**e-mail: dmitrytsypishka@tydex.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 TPX (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 CO₂-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 TPX 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° 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 4×3 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	≥90	≥60
Размеры (чистая апертура/диаметр × длина), мм ²	Ø57/Ø90 × 74.5	Ø71/Ø105 × 74.5

Тестирование объективов осуществлялось при помощи матрицы микроболометров с разрешением 320·240 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 аберраций. 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 ТГц)		
Максимальный диаметр входного пучка, мм	72	28.8	14.4
Общее пропускание*	65%		
Искажение волнового фронта @50 мкм	0.03λ	0.06λ	0.04λ
Габаритные размеры, мм ³	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 MICROXCAM-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/ .
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.

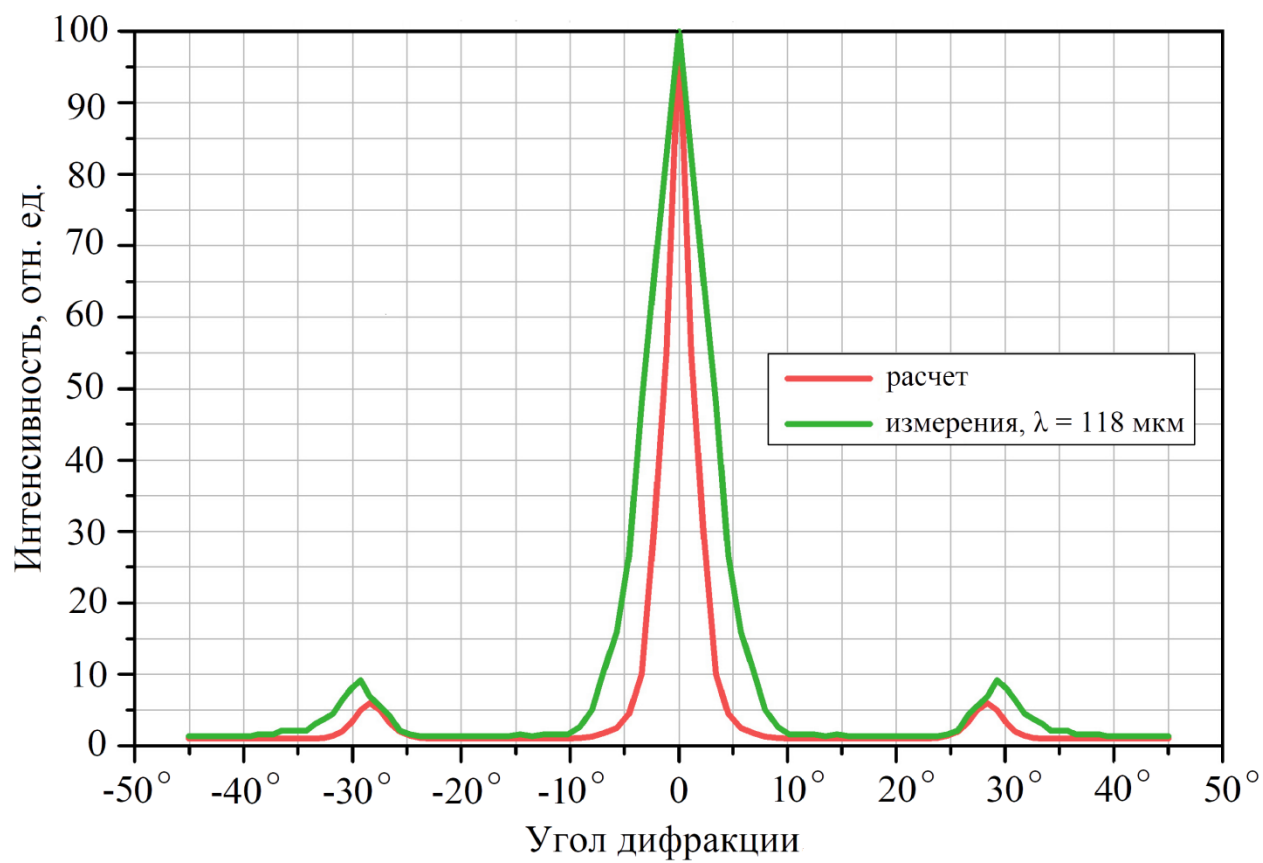


Рис. 1

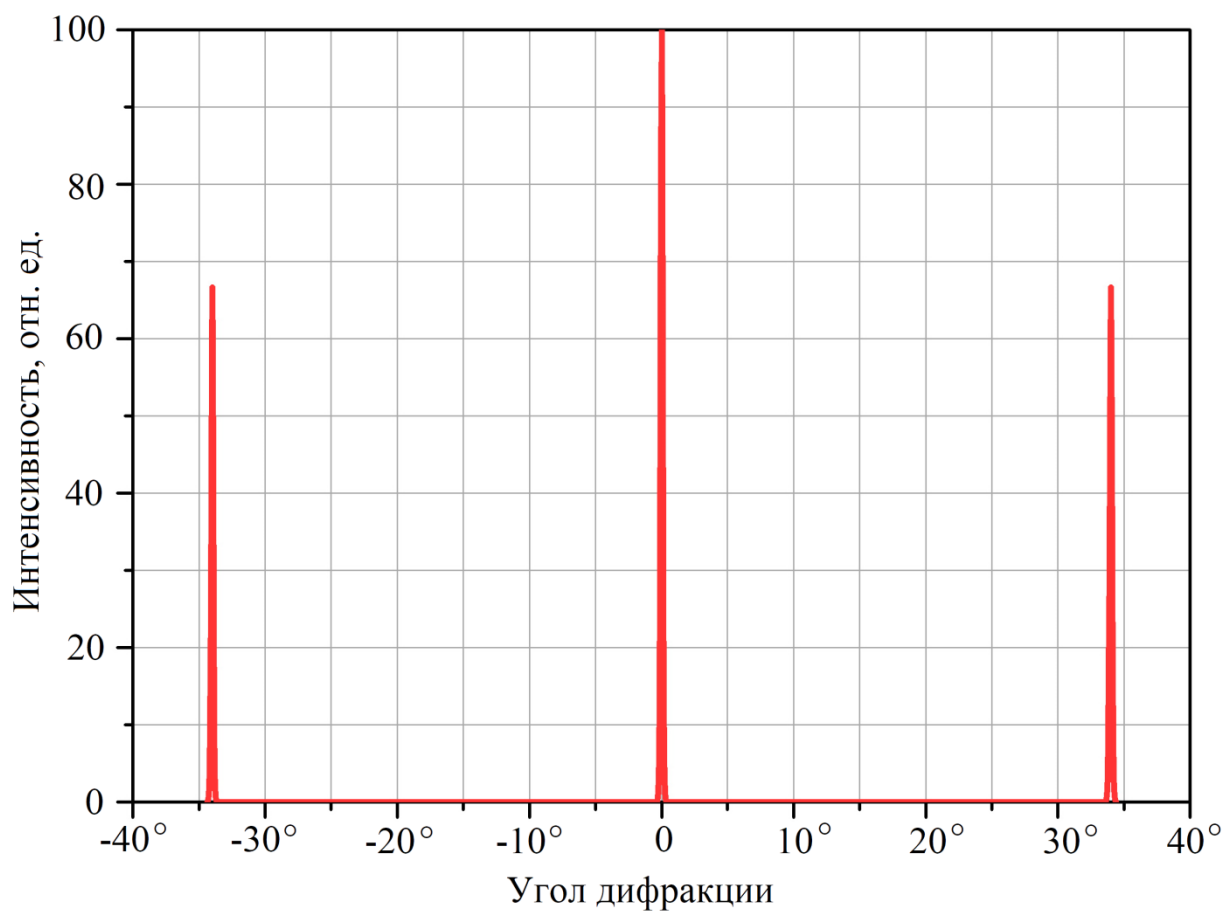


Рис. 2

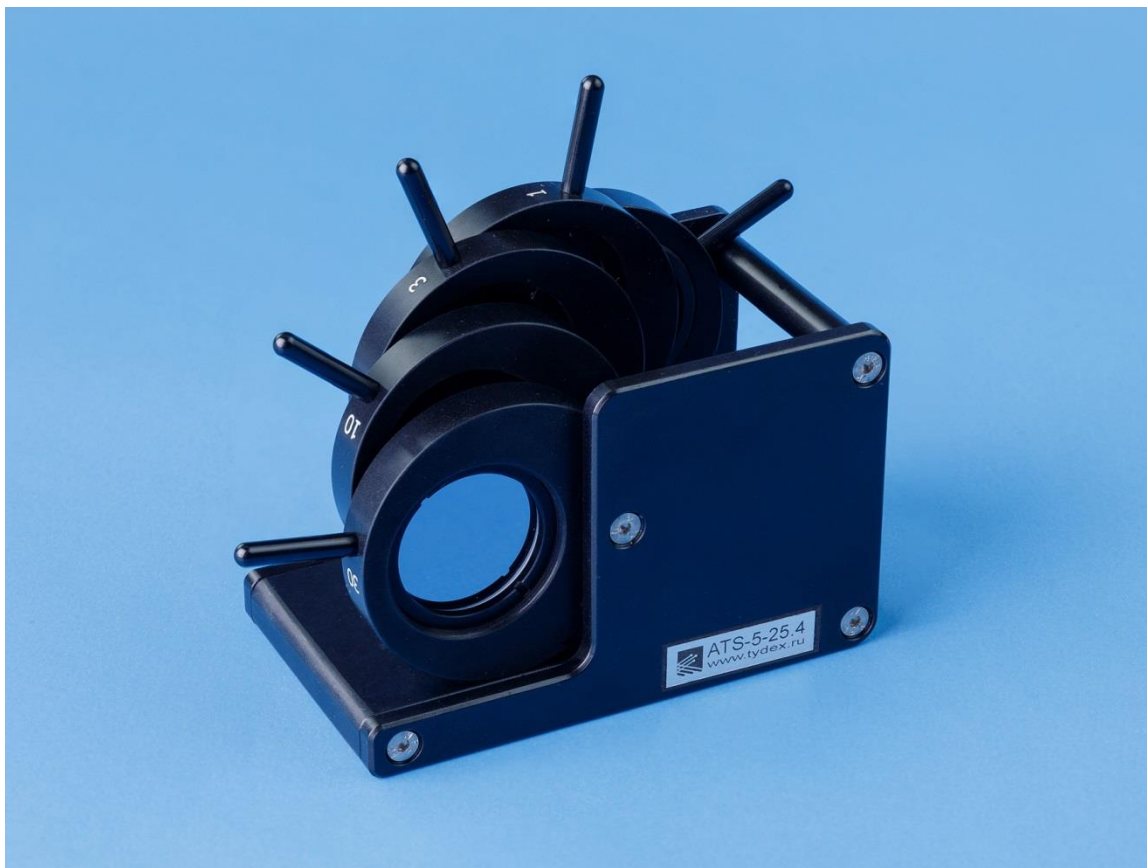


Рис. 3

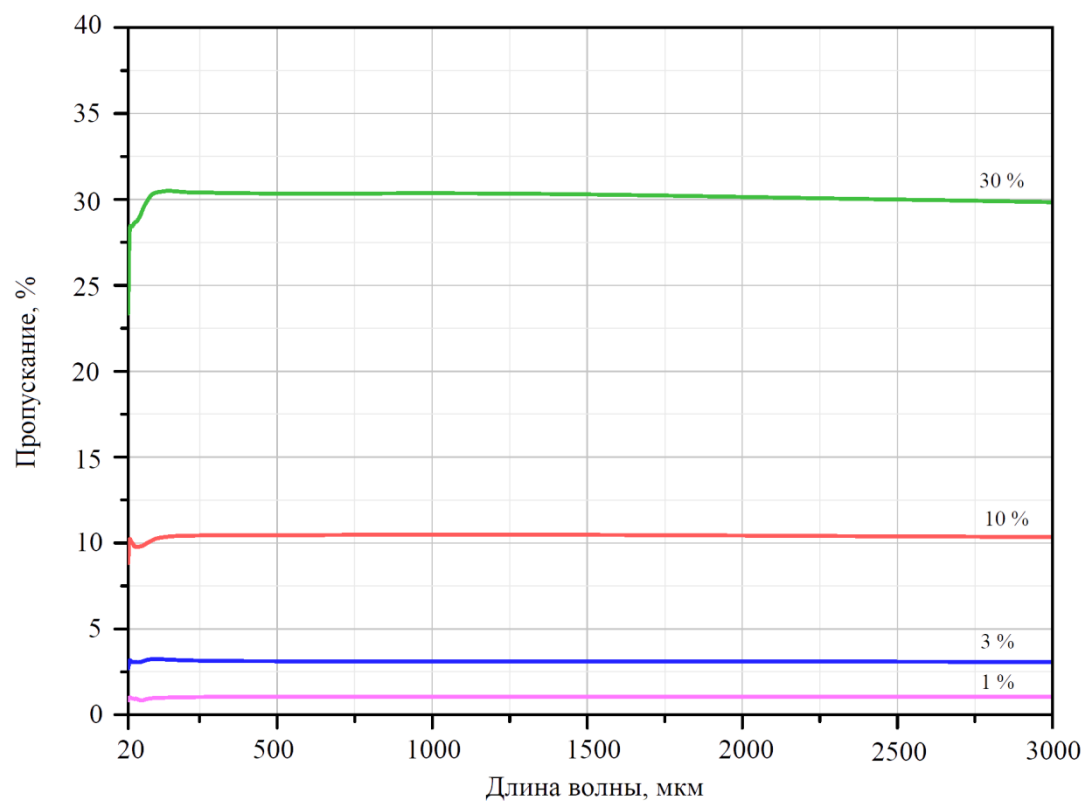


Рис. 4

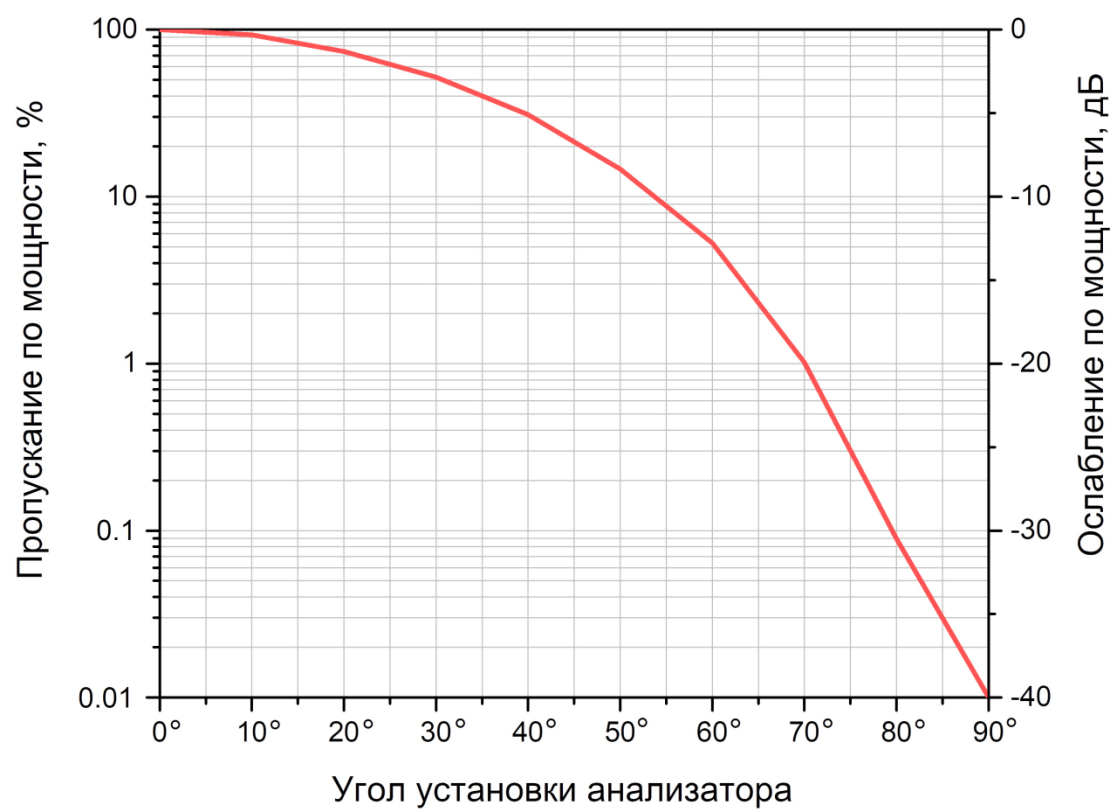


Рис. 5

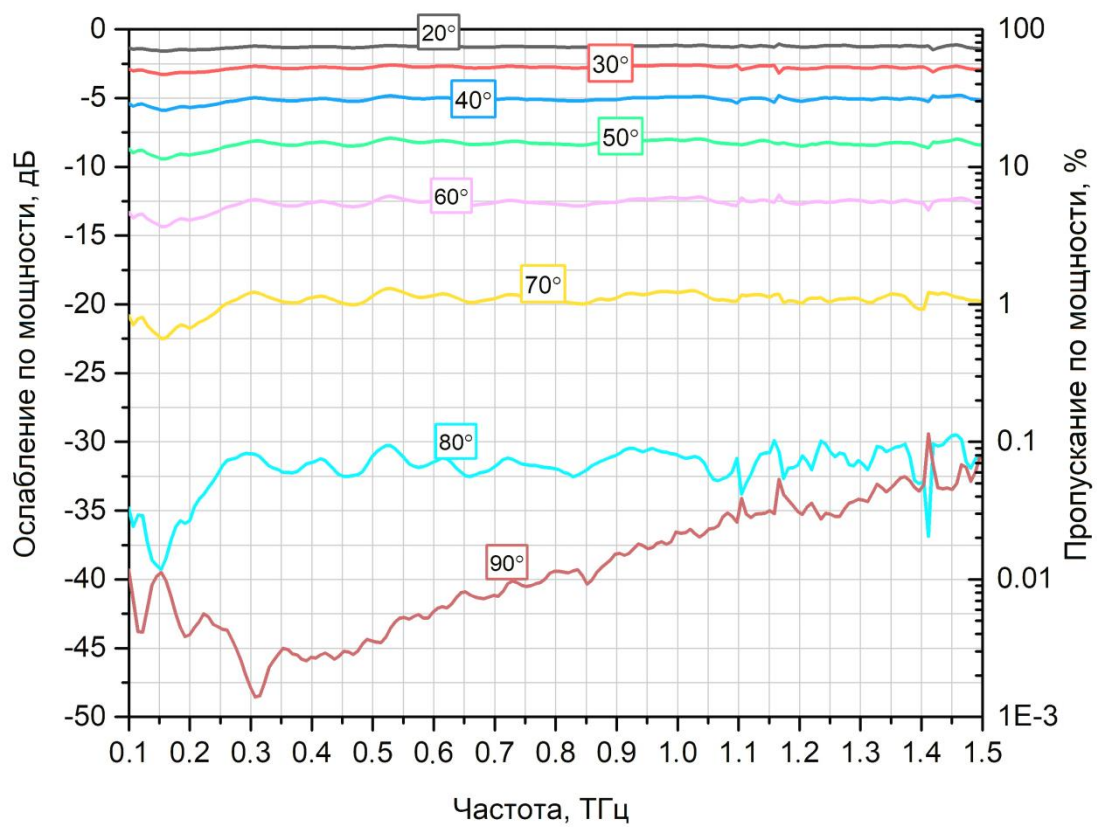


Рис. 6

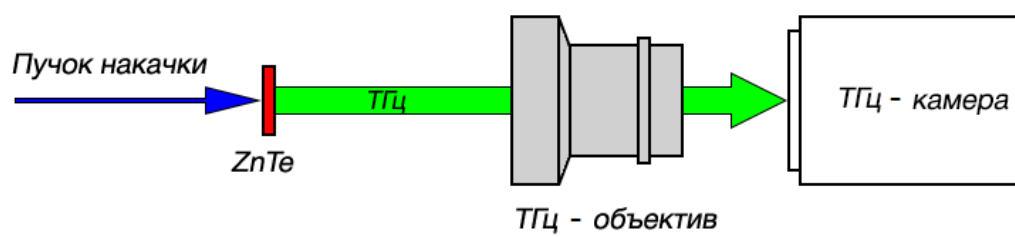


Рис. 7

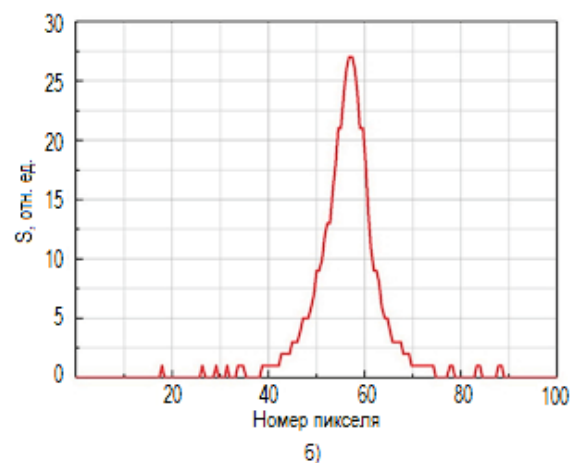
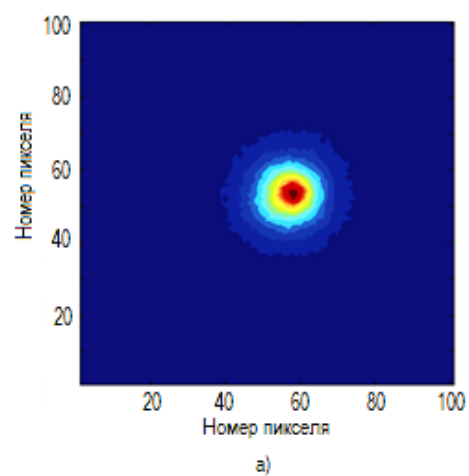


Рис. 8



Рис. 9

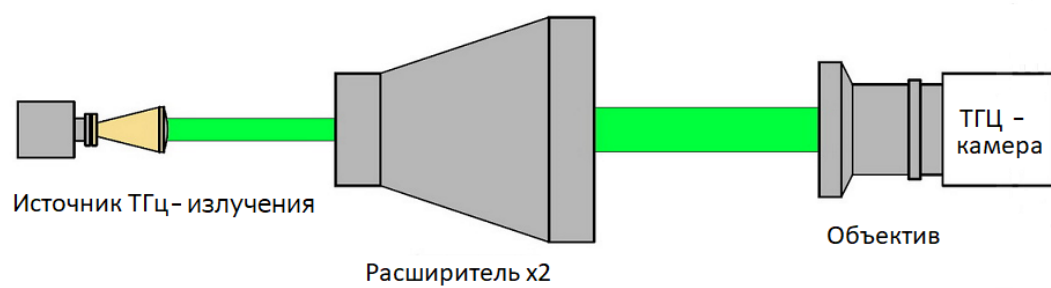
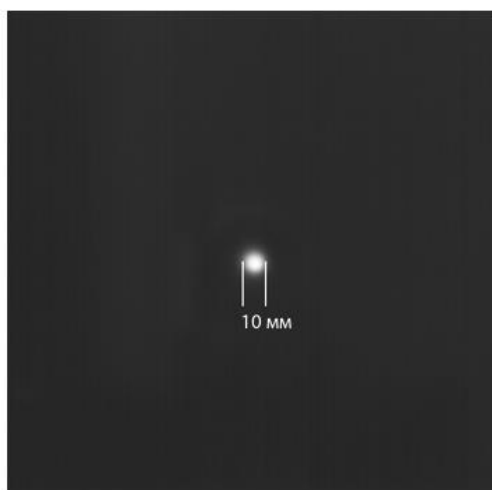
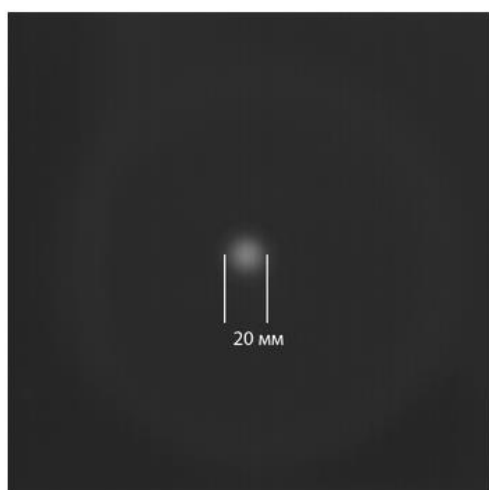


Рис. 10



a)



б)

Рис. 11