



Оптика для терагерцевых применений

Г. И. Кропотов, Д. А. Попов, Д. И. Цыпишка, А. А. Шахмин ООО «ТИДЕКС», Санкт-Петербург, Россия

В статье рассматриваются особенности изготовления оптических элементов для применения в приборах и устройствах терагерцевого диапазона, описываются свойства и характеристики оптических материалов для их производства, приводятся примеры применения. Особое внимание уделено элементам, используемым исключительно в терагерцевых системах и устройствах.

Ключевые слова: терагерцевое излучение, оптические элементы для терагерцевого диапазона, линзы Френеля, f-theta линзы

Статья поступила: 26.06.2025

Статья принята: 21.07.2025

ВВЕДЕНИЕ

Терагерцевым (ТГц) излучением называется электромагнитное излучение в интервале частот от 0,1 до 10 ТГц (длина волны 3 мм – 30 мкм). Оно хорошо проникает сквозь многие диэлектрические материалы, такие как пластмасса, ткань, бумага, картон, кожа, керамика, поглощается атмосферой Земли (в основном молекулами воды) и отражается от поверхности металлов. Излучение этого диапазона легко фокусируется, подобно инфракрасному (ИК) излучению. При этом оно не является ионизирующим, как рентгеновское. Эти свойства используются при производстве лекарств и контроле качества продовольственной продукции. Также представляет большой интерес использование ТГц-излучения в таких приложениях, как контроль безопасности, проверка упаковок, характеристика полупроводниковых материалов, анализ химического состава, биохимические исследования и область телекоммуникации.

Изготовление приборов, работающих в ТГц-диапазоне, связано с разработкой пассивных оптических элементов, изготавливаемых из матери-

Optics for Terahertz Applications

G. I. Kropotov, D. A. Popov, D. I. Tsyphiska, A. A. Shakhmin
TYDEX LLC, Saint Petersburg, Russia

The article discusses the production features of the optical elements for application in the THz range devices and equipment, describes the properties and specifications of optical materials for its production, and provides the application examples. Special attention is paid to the elements used exclusively in the THz systems and devices.

Keywords: terahertz (THz) radiation, optical elements for the terahertz range, Fresnel's lenses, f-theta lenses.

Article received: June 26, 2025

Article accepted: July 21, 2025

INTRODUCTION

The terahertz (THz) radiation is electromagnetic radiation in the frequency range from 0.1 to 10 THz (wavelength of 3 mm – 30 μm). It penetrates well through many dielectric materials, such as plastic, fabric, paper, cardboard, leather, ceramics. It is absorbed by the Earth's atmosphere (mainly by the water molecules) and is reflected from the metal surface. Radiation in this range is easily focused similar to the infrared (IR) radiation. Moreover, it is not ionizing, like X-rays. These properties are used in the production of pharmaceutical drugs and quality control of the food products. The application of THz radiation is of the utmost interest in such areas as safety monitoring, packaging inspection, characterization of semiconductor materials, chemical composition analysis, biochemical research and telecommunications.

The production of devices operating in the THz range is related to the development of passive optical elements made of materials that transmit the THz radiation rather well. These materials should have the low dispersion of THz waves, high thermal stability, mechanical strength, and chemical inertness. The reflective and transmitting properties of optical components can be changed, enhanced, or suppressed in a controlled manner by selection of the suitable materials and application of the special optical coatings to them.

алов, хорошо пропускающих ТГц-излучение. Эти материалы должны обладать низкой дисперсией ТГц-волн, высокой термической стойкостью, механической прочностью и химической инертностью. Отражающие и пропускающие свойства оптических компонентов могут быть контролируемо изменены, усилены или подавлены за счет подбора подходящих материалов, а также нанесения на них специальных оптических покрытий.

ВЫБОР МАТЕРИАЛОВ ДЛЯ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ТГц-ОПТИКИ

Традиционно для изготовления пассивных компонентов ТГц-фотоники используется *высокоомный кремний* (HRFZ-Si), выращенный методом зонной плавки [1] и имеющий удельное сопротивление в n-типе от 10 кОм×см, либо в p-типе от 25 кОм×см и выше. HRFZ-Si является изотропным кристаллическим материалом, прозрачным в широком диапазоне длин волн, начиная от ближнего ИК, и имеющим неизменное пропускание на уровне 50–54% от 40 микрометров до микроволн (рис. 1). Это позволяет создавать на его базе разнообразные оптические элементы для ТГц-оптоэлектроники.

Кроме Si, важную роль для ТГц-применений играют такие кристаллы, как кристаллический кварц, сапфир, германий, а также алмаз.

Кристаллический кварц является двулучепреломляющим материалом, что следует учитывать, если важна поляризация излучения. Для работы в ТГц-диапазоне при производстве $\lambda/2$ и $\lambda/4$ волновых пластин используется материал в геометрии «х-срез», когда поверхность пластины перпендикулярна оси x кристалла.

Наряду с кристаллическим кварцем для изготовления оптических элементов приборов, работающих в ТГц-диапазоне, иногда, когда поляризация излучения не важна, целесообразно использовать *плавленый кварц*. Его стоимость меньше, а обработка не требует ориентации кристалла и оптических элементов по кристаллографическим осям. Спектры пропускания кристаллического и плавленого кварца представлены на рис. 2.

Сапфир, подобно кристаллическому и плавленому кварцу, прозрачен в ТГц-области так же, как

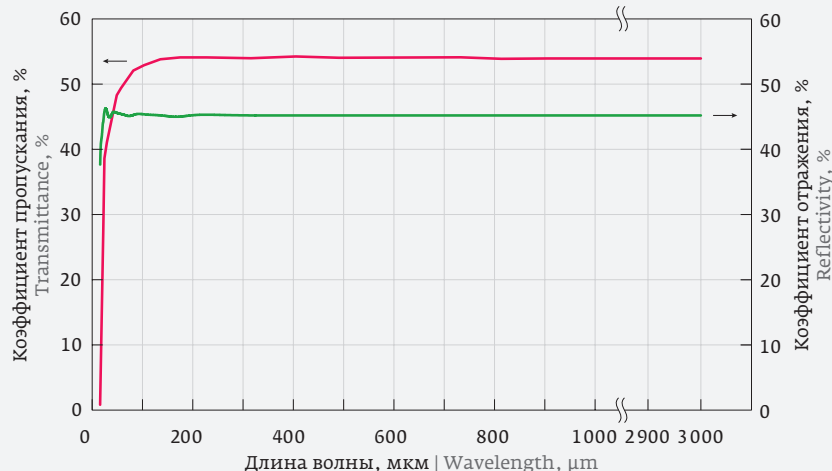


Рис. 1. Спектры пропускания и отражения HRFZ-Si
Fig.1. Transmission and reflectance spectra of HRFZ-Si

SELECTION OF MATERIALS FOR THE THz OPTICS PRODUCTION

Conventionally, the *high-resistance silicon* (HRFZ-Si) grown by the floating-zone method [1] and having a specific resistance in the n-type from 10 kOhm×cm, or in the p-type from 25 kOhm×cm and higher is used for the production of passive components of THz photonics. HRFZ-Si is an isotropic crystalline material being transparent in a wide range of wavelengths,

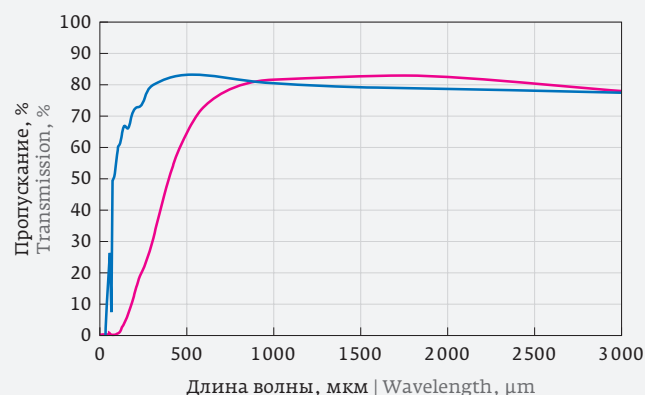


Рис. 2. Спектры пропускания пластин оптического кристаллического кварца (черный) и плавленого кварца (красный) толщиной 4 мм

Fig. 2. Transmission spectra of the optical crystalline quartz (black) and fused quartz (red) plates with the thickness of 4 mm

и в видимой (рис. 3). Подобно HRFZ-Si, из сапфира, имеющего близкий к кремнию показатель преломления, изготавливаются гипо-гипер- и полусферические линзы для ТГц-детекторов и генераторов на базе фотопроводящих антенн.

Германий в ТГц-диапазоне используется для изготовления активных элементов акустооптических устройств [2]. Также он применяется в многоспектральных тепловизионных приборах ИК + ТГц диапазонов [3].

Для изготовления окон входа-выхода в мощных источниках ТГц-излучения используется поликристаллический алмаз, который прозрачен от ультрафиолета до миллиметрового диапазона. Поликристаллический алмаз обладает высокой теплопроводностью и низким коэффициентом термического расширения, что позволяет ему выдерживать большие лучевые нагрузки [4].

Перспективным материалом для изготовления оптики в длинноволновой области ТГц-диапазона является *арсенид галлия* (GaAs). Об этом можно судить, сравнивая его спектр пропускания со спектрами HRFZ-Si и Ge (рис. 5).

Другую группу материалов ТГц-фотоники представляют полимеры. Некоторые из них имеют отличную прозрачность в ТГц-диапазоне при относительно низком отражении. Практическое использование находят полиметилпентен (TPX), Pícarin (Tsurupíca), циклоолефиновый полимер (Zeonex), циклический олефиновый сополимер (COC или TOPAS), полиэтилен (HDPE), высокомолекулярный полиэтилен (UHMWPE), политетрафлю-

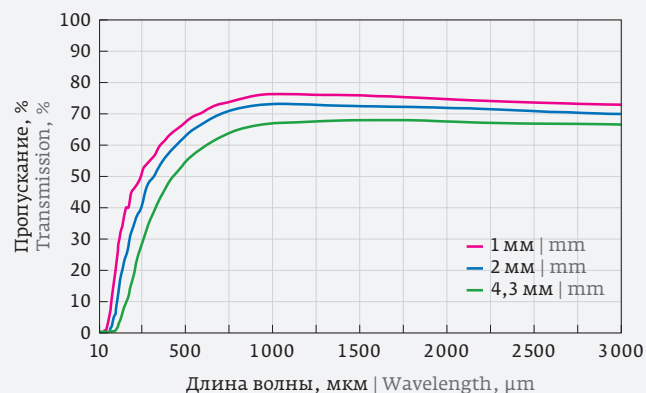


Рис. 3. Пропускание образцов сапфира толщиной от 1,0 до 4,3 мм

Fig.3. Transmission of sapphire samples with the thickness from 1.0 to 4.3 mm

starting from the near IR, and having a constant transmission at the level of 50–54% from 40 micrometers to the microwaves (fig. 1). This allows the development of various optical elements for the THz optoelectronics on its basis.

In addition to Si, the crystals such as crystalline quartz, sapphire, germanium, and diamond play an important role in the THz applications.

Crystalline quartz is a birefringent material that should be considered if the radiation polarization is important. For work in the THz range, the material in

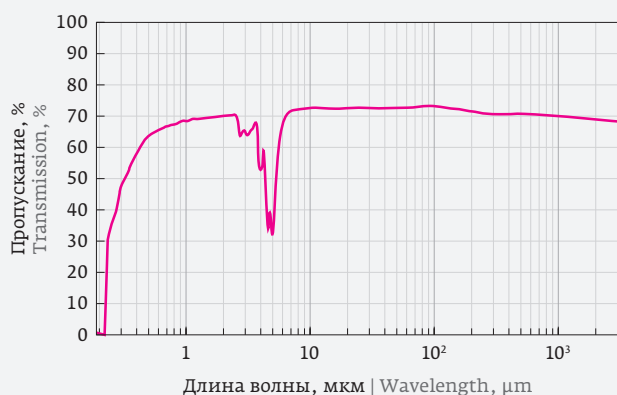


Рис. 4. Спектр пропускания алмазной пластины толщиной 0,5 мм

Fig. 4. Transmission spectrum of a diamond plate with the thickness of 0.5 mm

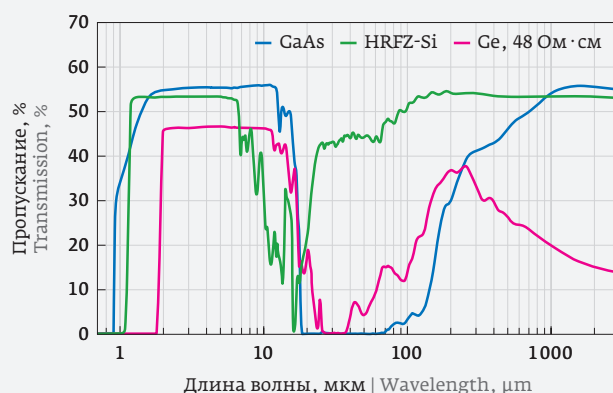


Рис. 5. Спектры пропускания пластин толщиной 5 мм из n-GaAs, HRFZ-Si и n-Ge

Fig. 5. Transmission spectra of n-GaAs, HRFZ-Si and n-Ge plates with the thickness of 5 mm

роэтилен (PTFE, фторопласт или тефлон), и полипропилен (PP) [5]. При больших длинах волн пропускание этих полимеров бесструктурное и плоское. При коротких длинах волн, как правило, меньше 200 микрометров, появляются характерные полосы поглощения (рис. 6), связанные с собственными колебаниями, а также увеличивается рассеяние на неоднородностях материала. Полимеры обычно становятся менее прозрачными при уменьшении длины волны.

ТРХ – это легчайший из всех известных полимеров. Он прозрачен в ультрафиолете, видимом и дальнем инфракрасном диапазонах, что, например, позволяет использовать гелий-неоновый лазерный луч для настройки ТГц-оптических систем. Его показатель преломления $\sim 1,46$, и он практически не зависит от длины волны в длинноволновом диапазоне. ТРХ – твердый прочный материал, который может быть механически превращен в различные оптические компоненты, такие как линзы и окна. Отметим такое специфическое применение ТРХ, как использование его в качестве выходного окна в газовых молекулярных лазерах, оптически накачиваемых CO_2 -лазером, вследствие его прозрачности во всем ТГц-диапазоне и абсолютного подавления излучения накачки в окрестностях $\lambda=10$ микрометров. Также окна из ТРХ применяются в криостатах в качестве «холодных» окон. Пропускание ТРХ в ТГц-диапазоне не зависит от температуры. Температурный коэффициент показателя преломления $-3,0 \cdot 10^{-4} \text{ K}^{-1}$ (для диапазона температур 8–120 К).

Полиэтилен – это легкий и эластичный кристаллизированный материал. Термостойкость некоторых марок полиэтилена достигает 110°C , допуская охлаждение до $-45 \div -120^\circ\text{C}$ в зависимости от марки. Полиэтилен имеет хорошие диэлектрические характеристики, химическую и радиационную стойкость. Показатель преломления $\sim 1,54$ и слабо меняется в широком диапазоне длин волн. Обычно для производства оптических компонентов используется полиэтилен высокой плотности (HDPE) или сверхвысокомолекулярный полиэтилен высокой плотности (UHMWPE). Тонкие пленки HDPE используются в ТГц-поляризаторах. Также HDPE применяется при изготовлении окон для оптоакустических приемников. Следует отметить, что пропускание HDPE в ТГц-диапазоне не зависит от температуры, что позволяет использовать его в криостатах. Его температурный коэффициент показателя преломления $-6,2 \cdot 10^{-4} \text{ K}^{-1}$ для диапазона температур 8–120 К. UHMWPE имеет хорошее сочетание жесткости и механической демпфиру-

the “x-cut” geometry is used in the production of $\lambda/2$ and $\lambda/4$ wave plates, when the plate surface is perpendicular to the x-axis of the crystal.

It is reasonable to use the *fused quartz* along with the crystalline quartz for the production of optical elements of devices operating in the THz range, when the radiation polarization is not important. Its cost is lower, and its processing does not require any orientation of the crystal and optical elements along the crystallographic axes. The transmission spectra of crystalline and fused quartz are shown in fig. 2.

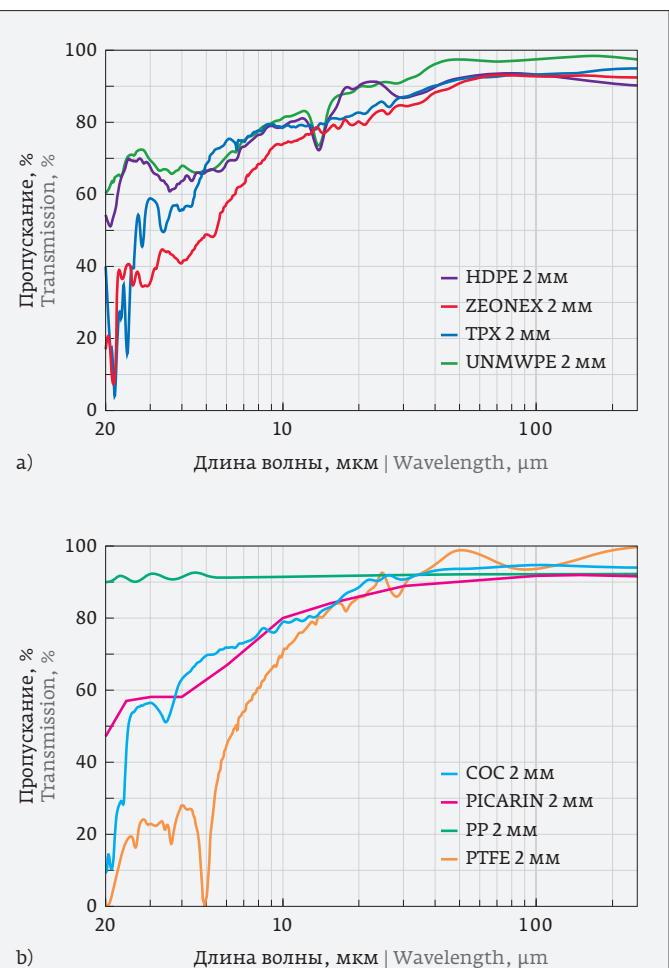


Рис. 6. Спектры пропускания:

a) ТРХ, полиэтилена (HDPE и UHMWPE) и ZEONEX;
b) COC, полипропилена (PP), тефлона (PTFE) и Picarin (Tsurupica)

Fig. 6. Transmission spectra of: a) TPX, polyethylene (HDPE and UHMWPE) and ZEONEX; b) COC, polypropylene (PP), Teflon (PTFE) and Picarin (Tsurupica)

ющей способности, хорошо поддается механической обработке. По совокупности свойств UHMWPE легче полируется, чем HDPE, что важно при изготовлении оптических элементов.

Политетрафторэтилен (PTFE) – это твердый и тяжелый пластик белого цвета с плотностью около 2,2 г/см³. Его температура плавления составляет 327 °С, при этом он сохраняет свои свойства в широком диапазоне температур от -73 °С до 204 °С. Показатель преломления $n \approx 1,43$ в широком диапазоне длин волн.

ZEONEX обладает отличными механическими свойствами, хорошей химической стойкостью и очень низкой дегазацией в условиях вакуума до 10⁻¹² мм.рт.ст. Лучшие по сравнению с TPX механические свойства ZEONEX делают возможным использование этого пластика для изготовления ТГц-призм.

СОС привлекателен из-за высокой рабочей температуры, отличного пропускания, низкого двулучепреломления и низкого влагопоглощения. Важным достоинством СОС является возможность изготовления из него разнообразных терагерцевых компонентов методом 3D-печати.

Для изготовления различных пассивных элементов ТГц-диапазона в некоторых случаях удобнее использовать **полипропилен**. Полипропилен получают полимеризацией пропилена в присутствии металлокомплексных катализаторов. Он более устойчив к воздействию агрессивных сред по сравнению с полиэтиленом HDPE и лучше обрабатывается механически.

Эффективное преобразование световых пучков ТГц-диапазона требует использования просветляющих **оптических покрытий** по аналогии с тем, как подобные покрытия используются в других (видимой и ИК) областях излучения. Однако в ТГц-области требуется применение специальных, прозрачных в этом диапазоне длин волн, покрытий из полимерных материалов. К таким относятся **поли-пара-ксилиленовые (ППК)** (париленовые) покрытия.

ППК покрытия характеризуются высокой однородностью и высокими защитными свойствами, инертностью к большинству органических растворителей и растворам кислот, щелочей и солей. Формирование покрытия не требует высоких температур, что исключает перегрев деталей. В покрытии отсутствуют внутренние напряжения.

Используя показатель преломления ППК $n = 1,63$, расчетным путем для просветления в нужном диапазоне длин волн можно определить толщину просветляющего покрытия. На рис. 7 показан участок

Sapphire similar to the crystalline and fused quartz, is transparent in the THz region as well as in the visible one (fig. 3). Similar to HRFZ-Si, the hypo-hyper and hemispherical lenses for the THz detectors and generators based on the photoconductive antennas are made from sapphire that has a refractive index close to the silicon's values.

Germanium is used in the THz range to manufacture the active elements of acoustic and optic devices [2]. It is also applied in the multispectral thermal imaging devices of the IR + THz ranges [3].

The polycrystalline **diamond** that is transparent for ultraviolet radiation to the millimeter range, is used to produce the entry and exit gates in the powerful THz radiation sources. The polycrystalline diamond has high thermal conductivity and a low thermal-expansion coefficient that allows it to withstand high radiation loads [4].

A promising material for the production of optics in the long-wavelength region of the THz range is **gallium arsenide (GaAs)**. This can be judged by comparing its transmission spectrum with the spectra of HRFZ-Si and Ge (fig. 5).

Another group of materials for THz photonics includes the polymers. Some of them have excellent transparency within the THz range with relatively low reflectivity. Polymethylpentene (TPX), Picarin (Tsurupica), cycloolefin polymer (Zeonex), cyclic ole-

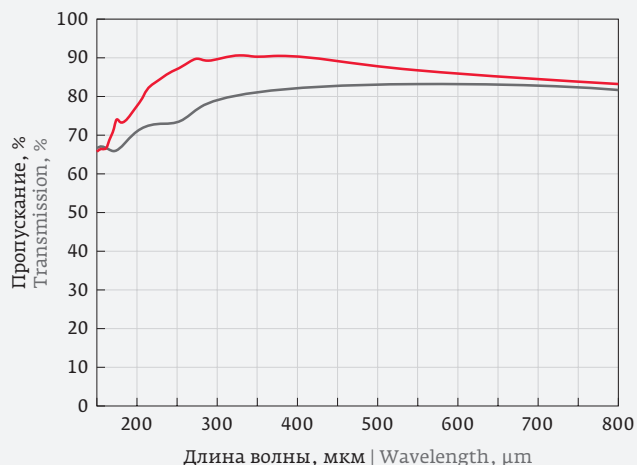


Рис. 7. Спектр пропускания пластины кристаллического кварца с двухсторонним просветляющим покрытием из ППК (красный) и без покрытия (черный)

Fig. 7. Transmission spectrum of a crystalline quartz plate with a double-sided antireflective coating made of PPX (red) and without coating (black)

спектра пропускания пластины из кристаллического кварца с двухсторонним просветляющим покрытием из ППК толщиной 60 мкм. Диапазон длин волн просветления 200–600 мкм. Просветляющие покрытия из ППК можно наносить и на подложки из HRFZ-Si.

ТГЦ-ОКНА, ЛИНЗЫ И ЗЕРКАЛА

В различных ТГц-приборах и устройствах широко применяются окна из HRFZ-Si, кристаллического кварца (z-срез) и сапфира, а также из пластиков. Окна могут быть как плоскопараллельные, так и клиновидные.

Окна, изготовленные из кристаллического кварца, обладают следующими важными свойствами:

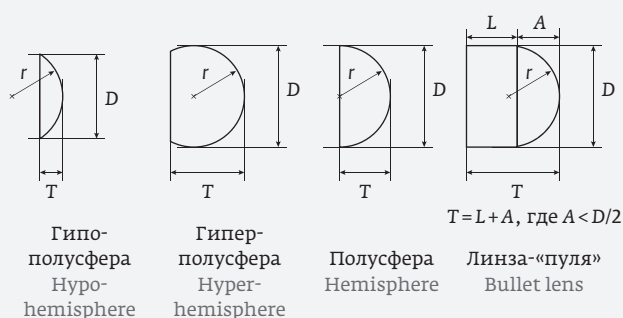
- они прозрачны в видимом диапазоне длин волн, что позволяет легко настраивать оптическую систему по гелий-неоновому лазеру;
- они не изменяют состояние линейной поляризации луча;
- они могут охлаждаться ниже λ -точки жидкого гелия.

Для ТГц-применений компания «ТИДЕКС» изготавливает линзы классической формы из HRFZ-Si и ТРХ [6]. Особую категорию представляют собой полусферические линзы различной формы: гиперполусферы, полусферы, гипополусферы и линзы – «пули» (рис. 8). Гиперполусфера – это небольшая оптическая поверхность, выполненная в форме полусферы, но с граничным изгибом, превышающим 180° . Гиперполусферы и полусферы используются в ТГц-оптических системах, основанных на эффекте твердотельной иммерсии [7]. Гипополусфера – это усеченная форма полусферической линзы. Она используется в различных ТГц-оптических системах и в ТГц-микроскопии [8]. Линза – «пуля» представляет собой полусферу, совмещенную с цилиндром, где радиус сферической поверхности равен R , диаметр цилиндра $2R$, а общая толщина L . Такие линзы применяются при изготовлении интегрированных линзовых антенн, в том числе для ТГц- и СВЧ-диапазонов. Полусферы и гиперполусферы из HRFZ-Si широко применяются для изготовления приемных устройств матричного типа в системах ТГц-сканирования и визуализации [9,10].

Si аксиконы. Коническая линза или аксикон (рис. 9) используется для преобразования гауссова пучка в пучок Бесселя. Аксикон фокусирует излучение в линию, состоящую из множества точек вдоль оптической оси. Полученная линия образует кольцо постоянной ширины с увеличивающимся диаметром при увеличении расстояния до



a)



b)

Рис. 8. Фотография и эскизы некоторых линз из HRFZ-Si: гипополусфера, гиперполусфера, полусфера, линза-«пуля»

Fig. 8. Photograph and sketches of some lenses made of HRFZ-Si: hypohemisphere, hyperhemisphere, hemisphere, "bullet" lens

fin copolymer (COC or TOPAS), polyethylene (HDPE), high-molecular-weight polyethylene (UHMWPE), polytetrafluoroethylene (PTFE, fluoroplast or Teflon),

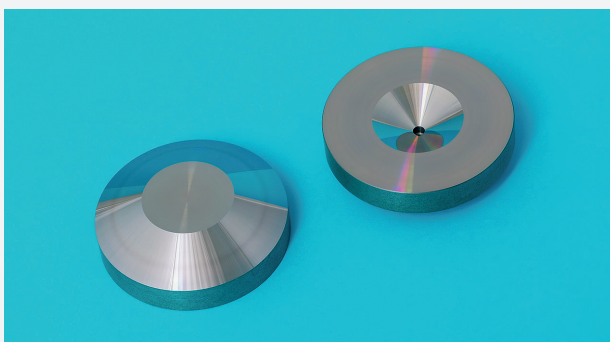


Рис. 9. Аксиконы из высокоомного Si

Fig.9. Axicons made of high-resistance Si

элемента (рис. 10). Изготавливаются аксиконы из HRfZ-Si.

ТГц-линзы Френеля. Управление излучением необходимо во многих ТГц-применениях. Чаще всего оно осуществляется с помощью параболических зеркал и рефракционной оптики. Однако дифракционная оптика предоставляет новые, принципиально другие возможности, поскольку позволяет осуществлять пространственное преобразование луча. Для удовлетворения потребностей в дифракционной оптике в ТГц-частотном диапазоне были разработаны метод расчета и технология изготовления ТГц-линз Френеля посредством 3D-печати [9].

Линзы Френеля имеют многоуровневый рельеф, максимально приближенный к идеальной форме фазовой функции дифракционного фокусатора в пятно. Монохроматическая и широкополосная линзы Френеля отличаются толщиной профиля микрорельефа. ТГц-монохроматические линзы Френеля (киноформы 1-го порядка) работают на расчетной частоте, частотах, кратных расчетной частоте, и в широком диапазоне высоких частот. ТГц-широкополосные линзы Френеля (киноформы высокого порядка) имеют широкий рабочий диапазон частот, который «сдвинут» ближе к расчетной частоте. Таким образом, ТГц-монохроматические линзы Френеля следует использовать в том случае, если требуется эффективное управление

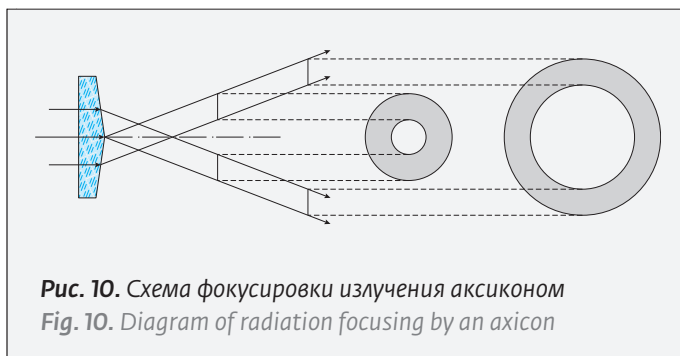


Рис. 10. Схема фокусировки излучения аксиконом
Fig. 10. Diagram of radiation focusing by an axicon

and polypropylene (PP) find their practical application [5]. At the long wavelengths, the transmission of these polymers is structureless and flat. At the short wavelengths (typically less than 200 micrometers), there are some typical absorption bands (fig. 6) related to the natural vibrations, with the enhanced scattering by the material inhomogeneities. The polymers usually become less transparent as the wavelength decreases.

TPX is the lightest of all well-known polymers. It is transparent in the ultraviolet, visible and far infrared ranges that, for example, allows using a helium-neon laser beam to tune the THz optical systems. Its refractive index is ~ 1.46 , and it is almost independent of wavelength in the long-wavelength range. TPX is a hard and durable material that can be mechanically converted into various optical components, such as lenses and windows. A certain specific application of TPX is its use as an exit gate in the gas molecular lasers optically pumped by a CO₂ laser, due to its transparency in the entire THz range and absolute suppression of pump radiation in the vicinity of $\lambda = 10$ micrometers. Moreover, the TPX gates are also used in the cryostats as the “cold” gates. The TPX transmission in the THz range is independent of temperature. The temperature coefficient of the refractive index is $-3.0 \cdot 10^{-4} \text{ K}^{-1}$ (for the temperature range of 8–120 K).

Polyethylene is a light and elastic crystallized material. The heat resistance of some polyethylene grades reaches 110 °C, allowing cooling to $-45 \div -120$ °C, depending on the grade. Polyethylene has good dielectric characteristics, chemical and radiation resistance. The refractive index is ~ 1.54 and is changed little over a wide range of wavelengths. The high-density polyethylene (HDPE) or ultra-high-molecular-weight high-density polyethylene (UHMWPE) are usually used to produce the optical components. The thin HDPE films are applied in the THz polarizers. HDPE is also used to make the gates for optoacoustic receivers. It should be noted that the HDPE transmission in the THz range

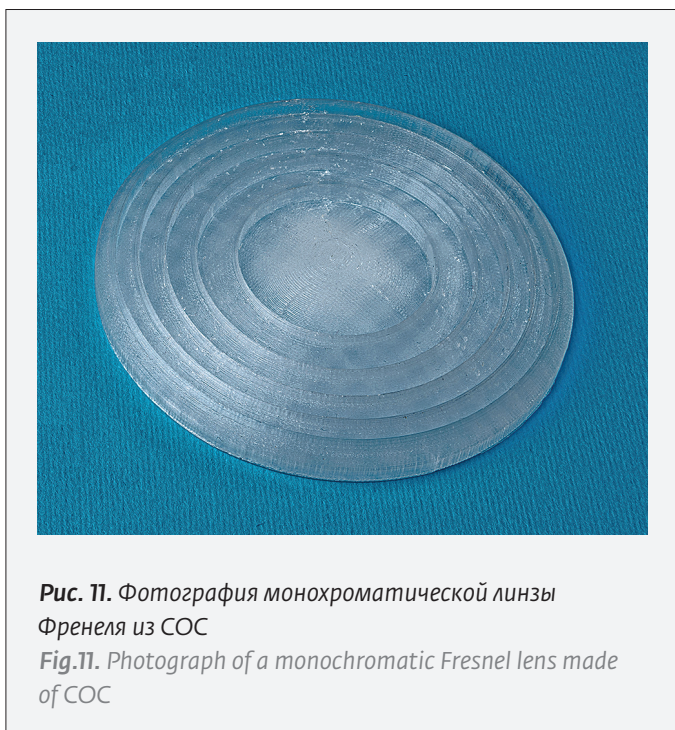


Рис. 11. Фотография монохроматической линзы Френеля из СОС

Fig. 11. Photograph of a monochromatic Fresnel lens made of COC

пучком ТГц-непрерывного излучения. ТГц-широкополосные линзы Френеля можно использовать для управления ТГц-импульсным излучением. В качестве материала изготовления для обоих видов ТГц-линз Френеля используется термопласт из циклоолефинового сополимера СОС. Основными преимуществами линз Френеля над рефракционными линзами является практически полное отсутствие сферических aberrаций, меньшая толщина и меньший вес при работе с пучками большого диаметра и, как следствие, лучшая лучевая стойкость за счет меньшего поглощения излучения внутри тела линзы.

ТГц-монохроматические линзы Френеля фокусируют ТГц-излучение лучше, чем рефракционные линзы. Сравнение интенсивности излучения, сфокусированного дифракционной линзой Френеля с интенсивностью излучения, сфокусированного рефракционной линзой из ТРХ, представлено на рис. 12.

ТГц-широкополосные линзы Френеля фокусируют ТГц-излучение не хуже, чем рефракционные линзы. На рис. 13 представлено сравнение спектра интенсивности излучения, сфокусированного дифракционной линзой Френеля (расчетная рабочая частота 1 ТГц, фокусное расстояние 90 мм, диаметр линзы 93 мм), со спектром интенсивности излучения, сфокусированного рефракционной линзой из ТРХ.

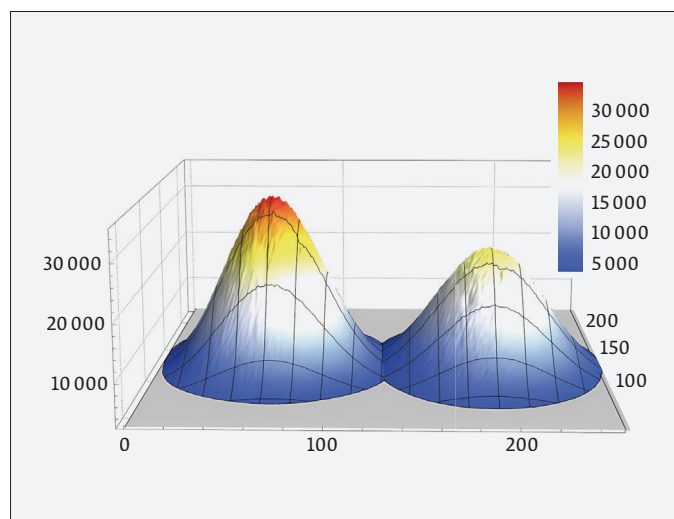


Рис. 12. График распределения интенсивности излучения, сфокусированного линзой Френеля (слева) и рефракционной линзой (справа)

Fig. 12. Distribution graph of radiation intensity focused by a Fresnel lens (left) and a refractive lens (right)

does not depend on temperature that allows it to be used in the cryostats. Its temperature coefficient of refractive index is $-6.2 \cdot 10^{-4} \text{ K}^{-1}$ for the temperature range of 8–120K. UHMWPE has a good combination of rigidity and mechanical damping capacity, and lends itself to machining with no difficulty. Based on the combination of properties, UHMWPE is easier to polish than HDPE that is important in the production of optical elements.

Polytetrafluoroethylene (PTFE) is a hard, heavy, white plastic with a density of about 2.2 g/cm^3 . Its melting point is $327 \text{ }^\circ\text{C}$, and it retains its properties over a wide temperature range from $-73 \text{ }^\circ\text{C}$ to $204 \text{ }^\circ\text{C}$. Its refractive index is $n \approx 1.43$ over a wide range of wavelengths.

ZEONEX has excellent mechanical properties, good chemical resistance and very low vacuum degassing in the conditions of up to 10^{-12} mmHg . The superior mechanical properties of ZEONEX compared to TPX make it possible to use this plastic for the production of THz prisms.

COC is attractive due to its high operating temperature, excellent transmittance, low birefringence, and low moisture absorption. An important advantage of COC is the possible production of various terahertz components using the 3D printing process.

In some cases it is more convenient to use *polypropylene* to manufacture various passive elements of the THz range. Polypropylene is obtained by polymerizing propylene in the presence of metal-complex catalysts.

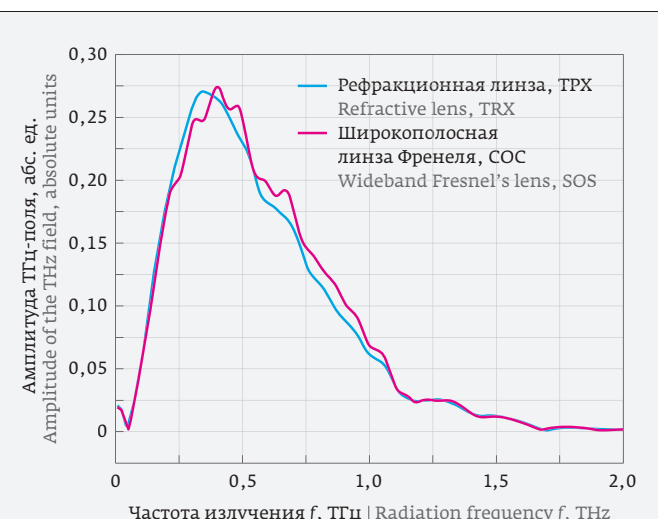


Рис. 13. Сравнение спектров амплитуды поля, сфокусированного линзами

Fig. 13. Comparison of the amplitude spectra of the field focused by the lenses



Рис. 14. ТГц асферическая f -theta линза
Fig.14. THz aspherical f -theta lens

Для фокусировки излучения в системах ТГц-визуализации и сканирования вместо сферических линз можно использовать f -theta линзы [6] (рис. 14), способные обеспечить плоскую фокусирующую поверхность и почти постоянный размер пятна по всему полю сканирования. Такие линзы разработаны для обеспечения линейного

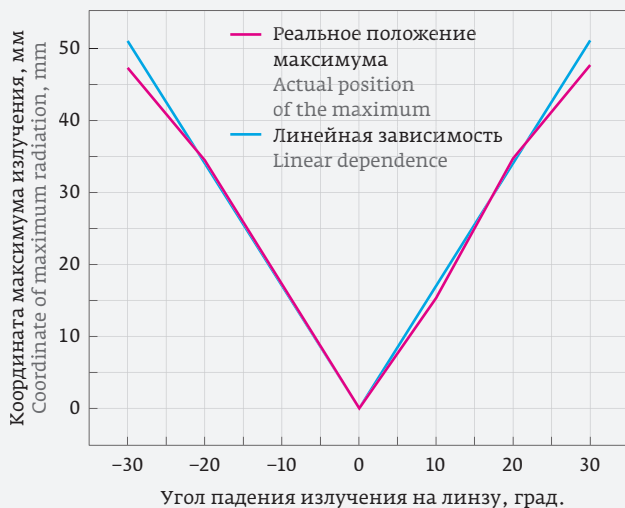


Рис. 15. Зависимость поперечной координаты максимума ТГц излучения в фокусе f -theta линзы от угла отклонения

Fig.15. Dependence of the transverse coordinate of the THz radiation maximum at the focus of f -theta lens from the angle of deviation

It is more resistant to the aggressive environments compared to the HDPE polyethylene and is better processed mechanically.

The efficient conversion of THz-range light beams requires the use of antireflective *optical coatings*, similar to the methods when such coatings are used in other (visible and IR) radiation regions. However, in the THz region, the special polymer coatings that are transparent in this wavelength range are required. These include *poly-para-xylylene* (PPX) (parylene) coatings.

The PPX coatings are specified by high homogeneity and high protective properties, inertness to most organic solvents and solutions of acids, alkalis and salts. The coating development does not require any high temperatures that eliminates overheating of parts. There are no internal stresses in the coating.

While using the refractive index of the PPX $n=1.63$, the antireflection coating thickness can be determined by calculation for antireflection in the required wavelength range. Fig. 7 shows a section of the transmission spectrum of a crystalline quartz plate with a two-sided antireflection coating made of PPX with a thickness of 60 μm . The range of antireflection wavelengths is 200–600 μm . The antireflection coatings made of PPX can also be applied to the HRFZ-Si substrates.

THz GATES, LENSES AND MIRRORS

In various THz devices and equipment, the gates made of HRFZ-Si, crystalline quartz (z-cut) and sapphire, as well as plastics, are widely used. The gates can be either plane-parallel or wedge-shaped.

The gates made of *crystalline quartz* have the following important properties:

- they are transparent in the visible wavelength range that allows easy tuning of the optical system for a helium-neon laser;
- they do not change the state of linear polarization of the beam;
- they can be cooled below the λ -point of liquid helium.

For the THz applications, TYDEX manufactures the lenses of classical shape using HRFZ-Si and TPX [6]. A special category includes the hemispherical lenses of various shapes: hyperhemispheres, hemispheres, hypohemispheres and “bullet” lenses (fig. 8). A hyperhemisphere is a small optical surface made in the shape of a hemisphere, but with a boundary bend exceeding 180°. The hyperhemispheres and hemispheres are used in the THz optical systems based on the solid-state immersion effect [7]. A hypohemisphere is a truncated form of a hemispherical lens. It is used in various THz optical systems and in the

смещения луча как линейной функции угла отклонения, что приводит к постоянной скорости сканирования на плоской поверхности. Они изготавливаются методом 3D-печати из СОС. F-theta линзы также обеспечивают постоянную фазу широкополосного ТГц-излучения в плоскости сканирования и высокое разрешение изображения. Изображения, формируемые объективами f-theta, обладают бочкообразным искажением, а положение пятна на плоскости изображения прямо пропорционально углу сканирования. Эта особенность устраняет необходимость сложной электронной коррекции и позволяет собирать быструю, относительно недорогую и компактную систему сканирования. F-theta линзы также обеспечивают постоянную фазу широкополосного ТГц-излучения в плоскости сканирования и высокое разрешение изображения.

На рис. 15 показана зависимость поперечной координаты максимума ТГц-излучения в фокусе f-theta линзы от угла отклонения (угла падения ТГц-излучения на f-theta линзу). Как видно из рисунка, в диапазоне углов от -25 до $+25$ градусов данная зависимость линейна, что позволяет проводить сканирование плоской поверхности с постоянной скоростью.

Для применений, где необходимо полностью отразить ТГц-излучение, компания «ТИДЕКС» предлагает использовать ТГц-зеркала [6]. Эти зеркала изготавливаются из плавленого кварца, покрытого золотом с защитой из пленок диоксида иттрия (I_2O_3) и диоксида кремния (SiO_2). Спектр отражения такого зеркала представлен на рис. 16.

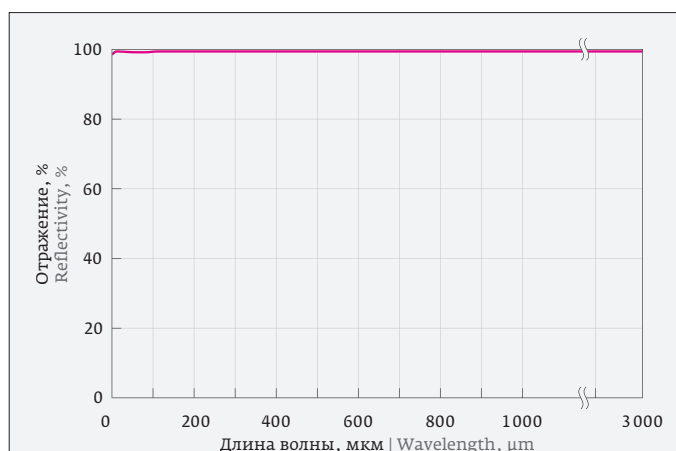


Рис. 16. Отражение ТГц зеркала

Fig.16. Reflection of the THz mirror

THz microscopy [8]. The “bullet” lens is a hemisphere combined with a cylinder, where the spherical surface radius is R , the cylinder diameter is $2R$, and the total thickness is L . Such lenses are applied in the manufacture of integrated lens antennas, including those for the THz and microwave ranges. The HRFZ-Si hemispheres and hyperhemispheres are widely used to produce the matrix-type receiving devices in the THz scanning and visualization systems [9,10].

Si axicons. A conical lens or axicon (fig. 9) is used to transform a Gaussian beam into a Bessel beam. The axicon focuses the radiation into a line consisting of many points along the optical axis. The resulting line generates a ring of constant width with an increasing diameter as the distance to the element increases (fig. 10). The axicons are made of HRFZ-Si.

THz Fresnel lenses. The radiation control is necessary in many THz applications. Most often, it is achieved using the full-parabolic deflectors and refractive optics. However, the diffractive optics provide new, fundamentally different possibilities, since it allows for spatial transformation of the beam. In order to meet the needs for diffractive optics in the THz frequency range, a calculation method and production technology for the THz Fresnel lenses using the 3D printing process have been developed [9].

The Fresnel lenses have a multi-level profile that is close to the ideal form of the phase function of the diffraction focuser into a spot to a maximum level. The monochromatic and broadband Fresnel lenses have various thickness of the microrelief profile. The THz-monochromatic Fresnel lenses (1st order kinoforms) operate at the rated frequency, frequencies multiple of the rated frequency, and in a wide range of high frequencies. The THz-broadband Fresnel lenses (high-order kinoforms) have a wide operating frequency range that is “shifted” closer to the rated frequency. Thus, the THz-monochromatic Fresnel lenses should be used in the cases where efficient control of the THz-continuous radiation beam is required. The THz-broadband Fresnel lenses can be used to control the THz-pulsed radiation. Thermoplastic made of cycloolefin copolymer COC is used as a material for both types of THz Fresnel lenses. The main advantages of Fresnel lenses over the refractive lenses include the almost complete absence of spherical aberrations, smaller thickness and lighter weight when working with the large diameter beams and, as a result, better radiation resistance due to the less radiation absorption inside the lens body.

The THz monochromatic Fresnel lenses focus THz radiation better than the refractive lenses. A comparison of radiation intensity focused by a diffractive

ТГц-СПЕКТРОДЕЛИТЕЛИ И ЛУЧЕДЕЛИТЕЛИ

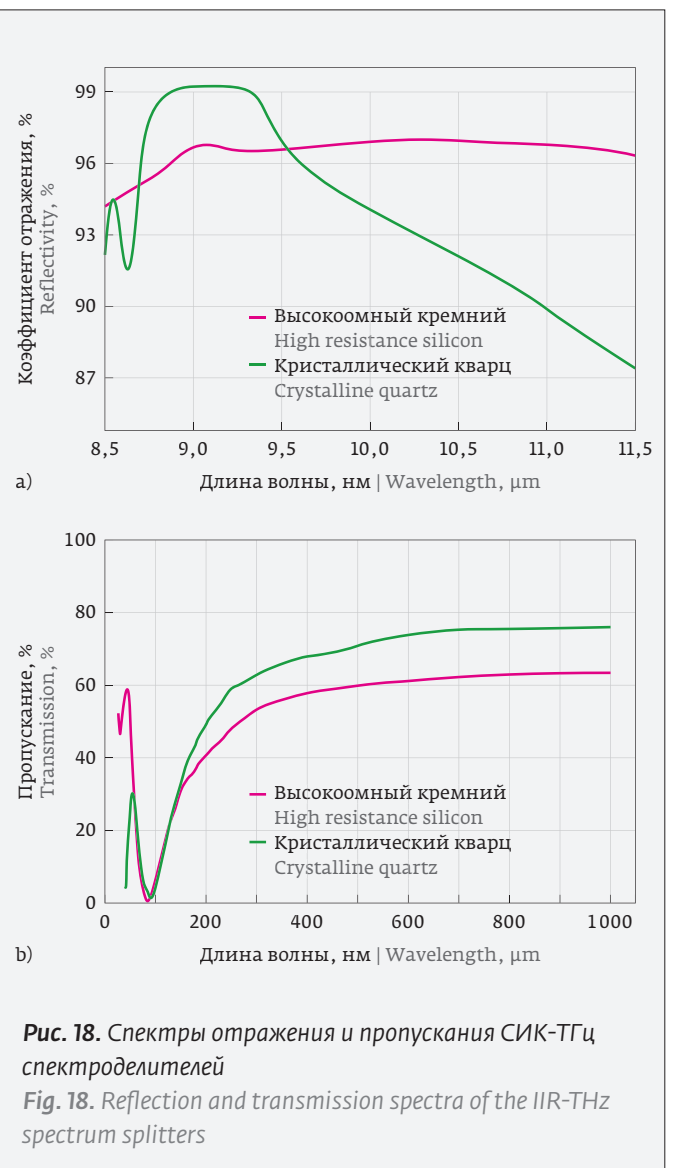
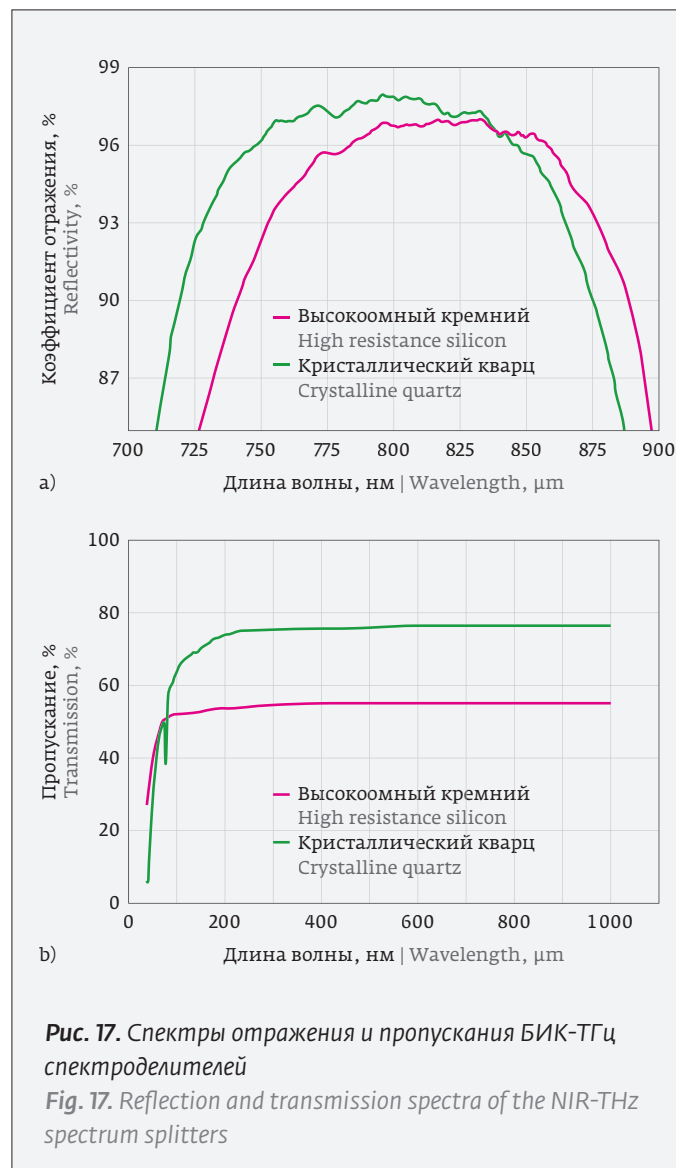
Для применений, где необходимо отразить ближнее инфракрасное (БИК) или среднее инфракрасное (СИК) излучение и сохранить при этом хорошее пропускание в ТГц-диапазоне, «ТИДЕКС» предлагает ТГц-спектроделители [6].

БИК-ТГц-спектроделитель используется для отделения ТГц-излучения от накачки титан-сапфирового лазера, а СИК-ТГц-спектроделитель – от накачки CO₂-лазера. Для изготовления БИК-ТГц-спектроделителей используются подложки из высокоомного Si или кристаллического кварца с нанесением высокоотражающего диэлектрического покрытия (R>90%) в диапазоне 730–860 нм. При изготовлении СИК-ТГц-спектроделителей на подложки из тех же материалов наносятся высо-

Fresnel's lens with the radiation intensity focused by a TPX refractive lens is shown in Fig. 12.

The THz broadband Fresnel lenses focus THz radiation no worse than the refractive lenses. Figure 13 shows a comparison of the radiation intensity spectrum focused by a diffractive Fresnel lens (rated operating frequency 1 THz, focal length 90 mm, lens diameter 93 mm) with the intensity spectrum of radiation focused by a refractive lens made of TPX.

To focus radiation in the THz imaging and scanning systems, it is possible to use f-theta lenses [6] (Fig. 14) instead of spherical lenses. They are capable of providing a flat focusing surface and a nearly constant spot size over the entire scanning field. Such lenses are designed to provide a linear beam offset as a linear function of the deflection angle that results





коотражающие покрытия в диапазоне 9–11 мкм. Спектры пропускания и отражения спектрорделителей приведены на рисунках 17 и 18.

Лучеделители – это оптические элементы, предназначенные для разделения луча света на две или более части. Они применяются в различных оптических схемах, а также в интерферометрах. Компания «ТИДЕКС» изготавливает ТГц-лучеделители двух типов [12]:

- однопроходные лучеделители (они используются в оптических схемах, где излучение проходит через делитель один раз);
- многопроходные лучеделители для интерферометров (такой делитель предназначен для многократного прохождения луча). В отличие от однопроходного, многопроходный лучеделитель имеет очень высокую плоскопараллельность поверхностей.

Материал для ТГц-лучеделителей – это высокоомный Si. Спектры пропускания и отражения приведены на рис. 1.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Расширение применения ТГц-излучения делает актуальными задачи разработки и изготовления эффективных оптических элементов для ТГц-диапазона. Новым в этой области является разработка и изготовление оптических элементов для управления характеристиками пучков ТГц-излучения в системах ТГц-визуализации и сканирования. Примерами таких решений служат линзы Френеля и f-theta линзы.

Для изготовления ТГц-оптики используются различные материалы как известные по изготовлению классической оптики, так и новые, ранее не находившие применения с этой целью. Приведенные в статье спектры и другие характеристики кристаллов и пластиков позволяют выбрать необходимые материалы для изготовления оптических компонентов для применения в исследовательских ТГц-системах, а также в различных ТГц-приборах.

REFERENCES

1. Rogalin V. E., Kaplunov I. A., Kropotov G. I. Optical Materials for the THz Range. *Opt. Spectrosc.* 2018; 125 (6): 1053–1064. DOI: 10.1134/S0030400X18120172. Rogalin V. E., Kaplunov I. A., Kropotov G. I. Оптические материалы для ТГц-диапазона. *Оптика и спектроскопия.* 2018; 125 (6): 851–863. DOI: 10.21883/OS.2018.12.46951.190-18.
2. Voloshinov V. B., Nikitin P. A., Gerasimov V. V., Knyazev B. A., Choporova Yu. Yu. Deflection of a monochromatic THz beam by acousto-optic methods. *Quantum Electron.* 2013; 43 (12): 1139–1142. DOI: <https://doi.org/10.1070/QE2013v043n12ABEH015195>. Волошинов В. Б., Никитин П. А., Герасимов В. В., Князев Б. А., Чопорова Ю. Ю. Отклонение пучка монохроматического терагерцевого

in a constant scanning speed on a flat surface. They are manufactured using the 3D printing process and COC. The f-theta lenses also provide a constant phase of broadband THz radiation in the scanning plane and high image resolution. The images obtained by the f-theta lenses have barrel distortion, and the spot position on the image plane is directly proportional to the scanning angle. This feature eliminates the need for comprehensive electronic adjustment and allows for the assembly of a fast, relatively inexpensive, and space-saving scanning system. The f-theta lenses also provide a constant phase of broadband THz radiation in the scanning plane and high image resolution.

Fig. 15 shows the dependence of the transverse coordinate of the THz radiation maximum at the focus of f-theta lens from the angle of deviation (angle of incidence of the THz radiation on the f-theta lens). As can be seen from the figure, in the range of angles from -25 to +25 degrees this dependence is linear that allows scanning a flat surface at a constant speed.

For the applications where it is necessary to completely reflect THz radiation, TYDEX suggests using the THz mirrors [6]. These mirrors are made of fused quartz coated with gold and protected by the films of yttrium dioxide (I_2O_3) and silicon dioxide (SiO_2). The reflection spectrum of such a mirror is shown in fig. 16.

THz SPECTRUM SPLITTERS AND BEAM SPLITTERS

For the applications where it is necessary to reflect the near infrared (NIR) or intermediate infrared (IIR) radiation while maintaining good transmission in the THz range, TYDEX offers the THz spectrum splitters [6].

The NIR-THz spectrum splitter is used to separate the THz radiation from the pump of a titanium-sapphire laser, and the IIR-THz spectrum splitter is used to separate from the CO_2 laser pumping. The high-resistance substrates made of Si or crystalline quartz with a highly reflective dielectric coating ($R > 90\%$) in the range of 730–860 nm are applied to produce the NIR-THz spectrum splitters. When producing the IIR-THz spectrum splitters, the highly reflective coatings in the range of 9–11 μm are applied to the substrates made of the same materials. The transmission and reflection spectra of the spectrum splitters are shown in Figures 17 and 18.

The beam splitters are optical elements designed to split a light beam into two or more parts. They are used in various optical schemes, as well as in the interferometers. TYDEX manufactures two types of the THz beam splitters [12]:



- излучения методами акустооптики. *Квант. электрон.* 2013; 43 (12): 1139–1142. DOI: 10.1070/QE2013v043n12ABEH015195.
3. Korotaev V. V., Melnikov G. S., Mikheev S. V., Samkov V. M., Soldatov Yu. I. *Fundamentals of thermal imaging.* – SPb: ITMO. 2012; – 123 pp (In Russ). Коротаев В. В., Мельников Г. С., Михеев С. В., Самков В. М., Солдатов Ю. И. *Основы тепловидения.* – СПб: ИТМО. 2012; – 123 с.
 4. Nusinovich G. S. *Introduction to the Physics of Gyrotrons.* – The Johns Hopkins University Press. 2004; 354 pp. DOI: <https://doi.org/10.1353/book.62236>.
 5. URL: https://www.tydexoptics.com/ru/products/thz_optics/thz_materials/.
 6. URL: https://www.tydexoptics.com/ru/products/thz_optics/.
 7. Zaytsev K. I., Gvdush A. A., Karasik V. E., Yurchenko S. O., Lebedev S. P. The method for studying the spectral optical characteristics of a homogeneous medium using terahertz pulsed spectroscopy. *Opt. Spectroscop.* 2015; 118 (4): 582–593. DOI: 10.7868/S0030403415040236. Зайцев К. И., Гавдуш А. А., Лебедев С. П., Карасик В. Е., Юрченко С. О. Метод исследования спектральных оптических характеристик однородной среды с помощью терагерцевой импульсной спектроскопии. *Оптика и спектроскопия.* 2015; 118 (4): 582–593. DOI: 10.7868/S0030403415040236.
 8. Chernomyrdin N. V., Shchadko A. O., Lebedev S. P., Spektor I. E., Tolstoguzov V. L. et al. Wide-Aperture Aspheric Optics for Formation of Subwavelength Caustics of a Terahertz Electromagnetic-Radiation Beam. *Opt. & Spectroscop.* 2018; 124 (3): 420–428. DOI: 10.1134/S0030400X18030086. Черномырдин Н. В., Щадько А. О., Лебедев С. П., Спектор И. Е., Толстогузов В. Л., Кучерявенко А. С., Малахов К. М., Командин Г. А., Горелик В. С., Зайцев К. И. Широкоапертурная асферическая оптика для формирования субволновой каустики пучка терагерцевого электромагнитного излучения. *Оптика и Спектроскопия.* 2018; 124 (3): 420–428. DOI: 10.21883/OS.2018.03.45664.250-17.
 9. Pisano G., Austermann J., Beall J., Halverson N., Hubmayr J., Jaehnig G., McKenney C. M., Raymond B., Suzuki A. Development of Flat SiliconBased Mesh Lens Arrays for Millimeter and Submillimeter Wave Astronomy. *Journal of Low Temperature Physics.* 2020; 199: 923–934. DOI:10.1007/s10909-019-02327-y.
 10. Zatta R.; Jain R.; Grzyb J.; Pfeiffer U. R. et al. Resolution Limits of Hyper-Hemispherical Silicon Lens-Integrated THz Cameras Employing Geometrical Multiframe Super-Resolution Imaging. *IEEE Transactions on Terahertz Science and Technology.* 2021; 11(3): 277–286. DOI: 10.1109/THZ.2021.3063839.

АВТОРЫ

- Кропотов Григорий Иванович, к. ф.- м. н., ст. науч. сотр., Генеральный директор ООО «ТИДЕКС», e-mail: grigorykropotov@tydex.ru; Санкт-Петербург, Россия. ORCID: 0000-0001-9041-6701
- Попов Дмитрий Александрович, к. ф.- м. н., науч. сотр. ООО «ТИДЕКС», e-mail: dmitriypopov@tydex.ru; Санкт-Петербург, Россия. ORCID: 0009-0007-2427-2341
- Цыпишка Дмитрий Иванович, к. ф.- м. н., доцент, зам. ген. директора по производству приборов ООО «ТИДЕКС», e-mail: dmitrytsypishka@tydex.ru; Санкт-Петербург, Россия. ORCID: 0000-0003-1914-5245
- Шахмин Алексей Александрович, к. ф.- м. н., ведущий инженер-исследователь ООО «ТИДЕКС», e-mail: AlexeyShakhmin@tydex.ru; Санкт-Петербург, Россия. ORCID: 0009-0003-9566-2823

ВКЛАД АВТОРОВ

Статья подготовлена на основе работы всех членов авторского коллектива.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов. Все авторы приняли участие в написании рукописи и согласны с полным ее текстом.

- single-pass beam splitters (they are used in the optical circuits where the radiation passes through the splitter once);
- multi-pass beam splitters for interferometers (such a splitter is intended for the multiple beam passes). In contrast to a single-pass one, a multi-pass beam splitter has very high plane-parallelism of surfaces.

The material for THz beam splitters is high-resistance Si. The transmission and reflection spectra are shown in Fig. 1.

CONCLUSION

The expanded application of THz radiation makes the development and production of efficient optical elements for the THz range relevant. The novelty in this area is the development and production of optical elements for controlling the THz radiation beam specifications in the THz imaging and scanning systems. Examples of such solutions include the Fresnel's lenses and f-theta lenses.

Various materials are used to produce the THz optics, both those well-known due to the manufacture of classical optics and new ones that have not previously found application for this purpose. The spectra and other specifications of crystals and plastics given in the article allow us to select the necessary materials for the manufacture of optical components for use in the research THz systems, as well as in various THz devices.

AUTHORS

- Kropotov Grigory, Cand. of Scien. (Phys&Math.), Senior Researcher, General Manager LLC «TYDEX», e-mail: grigorykropotov@tydex.ru; Saint Petersburg, Russia. ORCID: 0000-0001-9041-6701
- Popov Dmitry, Cand. of Scien. (Phys&Math.), Researcher LLC «TYDEX», e-mail: dmitriypopov@tydex.ru; Saint Petersburg, Russia. ORCID: 0009-0007-2427-2341
- Tsypishka Dmitry, Cand. of Scien. (Phys&Math.), associate professor, Deputy General Manager LLC «TYDEX», e-mail: dmitrytsypishka@tydex.ru; Saint Petersburg, Russia. ORCID: 0000-0003-1914-5245
- Shakhmin Alexander, Cand. of Scien. (Phys&Math.), Leading Research Engineer LLC «TYDEX», e-mail: AlexeyShakhmin@tydex.ru; Saint Petersburg, Russia. ORCID: 0009-0003-9566-2823

CONTRIBUTION OF THE AUTHORS

The article is based on the work of all members of the author's team.

CONFLICT OF INTEREST

The authors declare that there is no conflict of interest. All the authors participated in the writing of the manuscript and agree with its full text.

