

## Оптические материалы для THz диапазона

© В.Е. Роголин<sup>1,2</sup>, И.А. Каплунов<sup>2</sup>, Г.И. Кропотов<sup>3</sup>

<sup>1</sup> „НЦЛСК „Астрофизика“,  
125424 Москва, Россия

<sup>2</sup> Тверской государственный университет,  
170100 Тверь, Россия

<sup>3</sup> „Тидекс“,  
194292 Санкт-Петербург, Россия

e-mail: kaplunov.ia@tversu.ru

Поступила в редакцию 03.07.2018 г.

В окончательной редакции 14.08.2018 г.

Рассмотрены свойства оптических материалов для использования в терагерцовом (THz) спектральном диапазоне, являющемся пограничным между оптическим и радиодиапазонами. Актуальность направления, связанного с оптикой THz приборов, во многом определяется активизацией работ по созданию лазеров THz диапазона и выявлением существенных проблем по использованию оптических материалов для данных применений в целом. Настоящая работа посвящена анализу свойств, прежде всего оптических, применяемых THz материалов. Представлены характеристики, рассмотрены и сопоставлены физико-химические и оптические свойства традиционных и новых материалов, в том числе кристаллических (кремний, сапфир, кварц, алмаз, германий, карбид кремния), а также ряда полимерных (полиметилпентен, полиэтилен, фторопласт).

DOI: 10.21883/OS.2018.12.46951.190-18

### Введение

Электромагнитные волны в спектральном диапазоне  $\sim 0.1\text{--}10\text{ THz}$  ( $\sim 3\text{ mm}\text{--}30\text{ }\mu\text{m}$ ,  $3\text{--}300\text{ cm}^{-1}$ ), лежащем между микроволновым и дальним инфракрасным диапазонами, принято называть терагерцовым (THz) излучением.

Границы между видами излучения в разных источниках определяются по-разному. Максимальный допустимый диапазон THz частот  $10^{11}\text{--}10^{13}\text{ Hz}$ , диапазон длин волн  $\lambda = 3.0\text{--}0.03\text{ mm}$  соответственно. Такие волны еще называются субмиллиметровыми, если длина волны попадает в диапазон  $1\text{--}0.1\text{ mm}$ , или  $T$ -волны. THz диапазон является пограничным между оптическим и радиодиапазонами. Многие применения THz диапазона заметно отстают от соседних областей электромагнитного спектра — микроволнового и оптического диапазонов. Если методы исследования высокочастотной части THz диапазона ближе к применяемым для оптического и ИК-диапазонов, то низкочастотная часть этого диапазона обычно исследуется методами радиофизики [1–4]. В THz области лежат спектры излучения астрономических объектов, а также спектры сложных органических молекул (таких как белков, ДНК, некоторых взрывчатых веществ, вредных веществ — загрязнителей атмосферы).

В сравнении с видимыми или инфракрасными волнами THz излучение благодаря резкому подавлению релеевского рассеяния ( $\sim 1/\lambda^4$ ) может лучше проникать в мутные и мелкодисперсные среды, например кожа, пластики, одежда или бумага. Благодаря низкой энергии фотона оно не вызывает повреждений, характерных для ионизирующих излучений (таких, как рентгеновские

лучи, например). Поэтому активно исследуется возможность замены рентгеновских аппаратов в медицине на THz источники.  $T$ -волны не проникают в металлы. Эти свойства могут быть использованы в текущем производственном контроле (например, при производстве лекарств), контроле качества готовой продукции, в THz тепловидении. Большой интерес представляет развитие терагерцовой спектроскопии для характеристики полупроводниковых материалов и приборов, анализа химического состава, биохимических исследований, дистанционного обнаружения взрывчатых, отравляющих и наркотических веществ и т.д. [5–7]. Развитие терагерцовой локации в значительной мере сдерживается из-за отсутствия источников THz излучения высокой мощности с удовлетворительными массогабаритными характеристиками [1–4].

До недавнего времени лазерные технологии получения THz излучения почти не использовались, хотя впервые возможность создания THz лазера была продемонстрирована в 1970 г. [8]. Причин такой ограниченности много, в частности недостаточное понимание преимуществ этого диапазона перед другими диапазонами, низкий КПД создаваемых лазеров, слабое развитие приборной и метрологической базы этого диапазона, отсутствие хороших оптических материалов и высокое поглощение THz излучения в атмосфере. Но в настоящее время при более тщательном исследовании прохождения THz излучения в атмосфере найдены, хотя и узкие, но сравнительно удобные области пропускания. Относительно большое атмосферное затухание даже в окнах прозрачности оставляет, тем не менее, достаточно возможностей для разнообразных применений THz

излучения не только в вакууме, но и при атмосферном давлении воздуха [1].

Компактные источники THz излучения пока являются маломощными (порядка  $\text{mW} - \text{mW}$ ) [9]. Это, например, квантово-каскадные лазеры на гетероструктуре AlGaAs/GaAs, диод Ганна, лавинно-пролетные диоды, резонансные туннельные диоды и т.д. В работе [10] сообщается о получении при температуре жидкого гелия в кристалле Ge *p*-типа лазерного излучения с  $\lambda = 750 \mu\text{m}$ . Источники, использующие электрооптический эффект в фотопроводящих материалах с пикосекундными временами релаксации носителей заряда, например, в полупроводниковых кристаллах, требуют использования лазеров импульсного излучения фемтосекундной длительности, которые нельзя назвать компактными.

Длинноволновое THz излучение ( $\sim 3 \text{ mm}$ ) со средней мощностью  $\sim 1 \text{ MW}$  получают в гиротронах. Гиротроны разработаны в 60-х годах прошлого столетия, использовались в токамаках, и сейчас активно применяются в международном проекте по созданию экспериментального термоядерного реактора (ITER project). Представляют собой электровакуумный СВЧ-прибор, в котором поток электронов, вращающихся в однородном внешнем магнитном поле, на частотах, близких к циклотронной частоте или ее гармоникам, генерирует THz излучение [11].

Основные исследования мощных когерентных *T*-волн ведутся в области лазеров с оптической накачкой. Теоретический предел эффективности этих THz лазеров подчиняется соотношению Мэнли–Роу [12]. В работе [13] сообщается о теоретических предпосылках, что когда дисперсия групповых скоростей оптических импульсов мала, можно существенно превысить предел преобразования Мэнли–Роу за счет каскадных процессов

$$\varepsilon = \frac{\nu_{\text{FIR}}}{2\nu_{\text{IR}}},$$

где  $\varepsilon$  — эффективность преобразования излучения накачки в THz,  $\nu_{\text{FIR}}$  — частота THz излучения,  $\nu_{\text{IR}}$  — частота фотонов накачки. Типичные значения эффективности  $\sim 10^{-4} - 10^{-3}$ .

Из закона Мэнли–Роу видно, что энергетически наиболее выгодно использовать для накачки THz сред максимально длинноволновое излучение. Из широко распространенных источников накачки — это CO<sub>2</sub>-лазеры, обладающие КПД  $\sim 10\%$  [12,14]. Существуют два основных способа использования оптической накачки для получения генерации сравнительно мощного лазерного THz излучения. Это накачка газовых сред, из которых уже изучено несколько сотен и получено несколько тысяч линий [15], а также генерация волны с разностной частотой в нелинейных кристаллах [14,16–18].

Выделение волны с разностной частотой в нелинейных кристаллах из-за нелинейности электрических свойств кристалла сопровождается генерацией электромагнитной волны с частотой  $\omega_3$ , равной разности частот

$\omega_1 - \omega_2$ , падающих на образец волн [14,16–19]. Лазеры на разностной частоте двух CO<sub>2</sub>-лазеров, излучающих на  $\lambda = 10.6$  и  $10.3 \mu\text{m}$ , при смешивании в GaAs, достигают мощности  $10^6 - 10^9 \text{ W}$  в пикосекундном импульсе [14,16–18].

Одним из методов генерации сравнительно высокоэнергетичных (миллиджоульного уровня) импульсов THz диапазона является способ оптического выпрямления сверхкоротких лазерных импульсов в нелинейных кристаллах, что имеет место при прохождении через кристалл интенсивного лазерного импульса нелинейной поляризации, повторяющей форму огибающей оптического импульса [2]. Возникающий всплеск тока может быть эффективным источником THz излучения.

Сравнительно высокоэнергетичное лазерное THz излучение получают также генерацией в лазере на свободных электронах. Новосибирский лазер на свободных электронах излучает до  $400 \text{ W}$  в коротковолновом диапазоне THz ( $\lambda \sim 120 - 240 \mu\text{m}$ , длительность импульса  $\tau \sim 100 \text{ ps}$ , частота следования —  $f = 5.6 \text{ MHz}$ ) [20].

Для работы с таким излучением необходимы высококачественные оптические материалы, способные эффективно работать при высоких лучевых нагрузках. Следует учитывать, что взаимодействие с излучением с оптическими материалами в THz области несколько отличается от традиционных видимого и ИК диапазонов [5,21,22]. Настоящая работа посвящена анализу свойств оптических материалов, пригодных для использования в THz диапазоне.

## 1. Кристаллы

Обычно для THz оптики используют такие кристаллы, как кремний, кристаллический кварц и сапфир [23]. В мощных THz источниках применяют поликристаллический алмаз (ПА), использование которого может, хотя бы частично, позволить преодолеть отставание применения THz диапазона от других, традиционно используемых диапазонов электромагнитного излучения [24,25].

Потери излучения в кристаллах происходят по двум основным причинам. Это поглощение на колебаниях решетки (фононное поглощение) и на свободных носителях заряда. Наилучшей решеткой для THz кристаллов считается структура алмаза, в которой кристаллизуются также германий и кремний. Концентрация свободных носителей заряда обобщенно может быть оценена по величине ширины запрещенной зоны ( $\Delta E_g$ ). Однако следует учитывать, что сечение поглощения носителей в разных материалах может заметно отличаться. Тем не менее понятно, почему наилучшим THz кристаллом является алмаз с  $\Delta E_g = 5.5 \text{ eV}$  [25]. Но поскольку алмазы, даже поликристаллические, пока значительно дороже других THz кристаллов, то они используются лишь в мощных источниках.

Проблемой использования кристаллической оптики THz диапазона является значительная величина потерь

на френелевское отражение, вызванная большой величиной показателя преломления. Из-за большой длины волны традиционные методы просветления оптики в THz области не работают. Компания „Тидекс“ предлагает нанесение париленового покрытия [23]. Технология нанесения парилена на плоские поверхности в микроэлектронике хорошо известна. Улучшив ее, удалось добиться качественного нанесения покрытия на оптические поверхности как плоские, так и сферические. Но в прецизионных кремниевых линзах, предназначенных для субмиллиметровых астрономических применений, потери составили ~6%, что оказалось слишком много [26].

В работе [26] анализируются и другие методы просветления кремния для THz диапазона. Подробно рассмотрены методы просветления путем получения на поверхности дифракционного рисунка механической обработкой, а также создания тонких протравленных слоев кремния, изготовленных глубоким реактивным ионным травлением, для последующего склеивания с линзами. Показано, что дифракционные методы просветления более эффективны и позволяют достичь потерь на отражение менее 1% на каждом интерфейсе от 0.787 до 0.908 THz. Физические эффекты, возникающие при создании на оптической поверхности периодических рельефных структур с высокой степенью регулярности и периодом меньше длины волны излучения, подробно изложены в монографиях [27,28]. Этим же методом возможно создание плоских линз.

Алмаз, германий и кремний являются изотропными кристаллами, поэтому их пропускание не зависит от ориентации кристалла. Карбид кремния, кристаллический кварц и сапфир анизотропны, что необходимо учитывать при использовании.

Германий и кремний хорошо обрабатываются, что позволяет формировать из них высокоточные оптические детали. Однако поскольку кремний гораздо более распространен в природе и значительно дешевле, то изделия из германия используются только в тех случаях, когда Ge имеет явное преимущество перед кремнием. Кремний является материалом для разнообразных систем средней ИК области спектра (3–5 μm), а германий применяется преимущественно для приборов, работающих в атмосферном окне 8–14 μm, так как у кремния в этой области значительное фоновое поглощение. Благодаря высокому значению показателя преломления и хорошим физико-химическим свойствам германий и, особенно кремний, широко используются для изготовления подложек высококачественных интерференционных зеркал с коэффициентом отражения 99.5% и даже более и узкополосных интерференционных фильтров для различных областей ИК спектра. Изделия из Ge и Si удобны в эксплуатации, не взаимодействуют с атмосферной влагой, не токсичны, прочны, имеют хорошие теплофизические свойства. Основные физические свойства кристаллов для THz приведены в табл. 1.

### 1.1. Высокоомный кремний, выращенный методом зонной плавки (HRFZ-Si)

Наиболее часто в THz оптике используется высокоомный кремний, выращенный методом зонной плавки (HRFZ-Si), как самый исследованный материал, хорошо пропускающий THz излучение. Кремний является одним из наиболее технологичных материалов, позволяющим создавать на его базе разнообразные оптические элементы быстроразвивающейся THz электроники. По сравнению с другими оптическими материалами он дешевле в выращивании и обработке, а также имеет существенно более крупные размеры, позволяющие разнообразить ассортимент производимых оптических деталей.

Высокоомный кремний является основным изотропным кристаллическим материалом, подходящим для использования в чрезвычайно широком диапазоне длин волн — от ближнего ИК (1.2 μm) до миллиметрового (1000 μm) и более (рис. 1, 2). Но фактически этот материал может использоваться в гораздо более широком диапазоне длин волн.

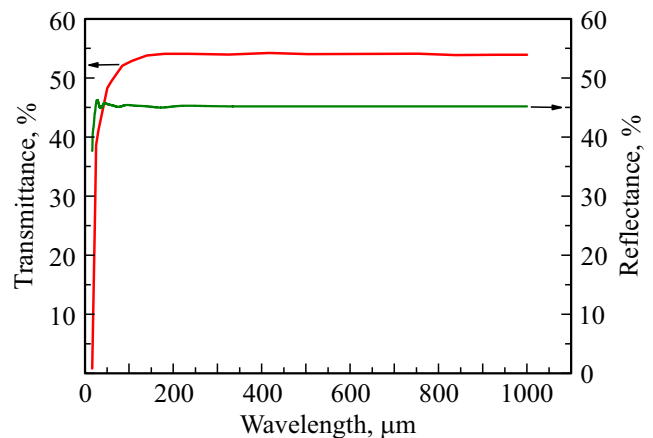


Рис. 1. Пропускание и отражение высокоомного кремния толщиной 1 mm в THz диапазоне [29].

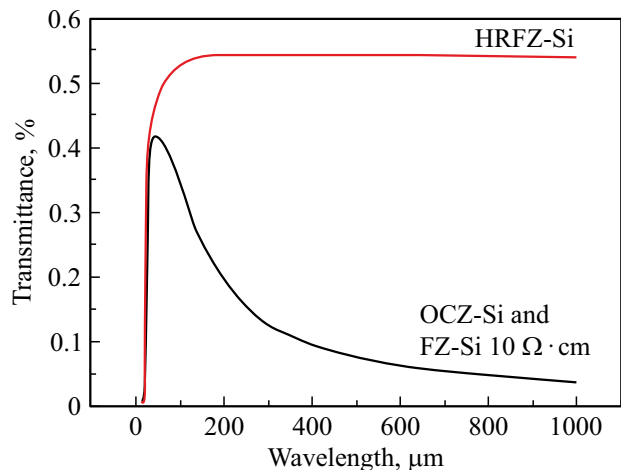


Рис. 2. Пропускание кремния в диапазоне 16–1000 μm, толщина образцов 5 mm [29].

Таблица 1. Основные физические свойства кристаллов [9,23-25,34,40-46]

Кристалл	Ge	Si	SiC	Кристалл кварц	Сапфир	Алмаз
Показатель преломления ( $\lambda = 10.6 \mu\text{m}$ )	4.0	3.4	3.12	$n_o = 1.535$ $n_e = 1.544$ ( $\lambda = 1.0 \mu\text{m}$ )	1.75 ( $\lambda = 1.06 \mu\text{m}$ )	2.38
Плотность, $\text{g/cm}^3$	5.33	2.33	3.21	2.65	3.97	3.51
Твердость (по Моосу)	6.0	7.0	9.5	7,0	9.0	10
Температура плавления, $^\circ\text{C}$	936	1412	2830	1470	2040	700*
Модуль Юнга (НПа)	138	189	392	97.2 ( $\parallel$ оси Z)	335	883
Теплопроводность (300 К, $\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ )	59	152	490	10.7 ( $\parallel$ оси Z)	27.21	2000
Удельная теплоемкость ( $\text{J} \cdot \text{cm}^{-3} \cdot \text{K}^{-1}$ )	1.652	4.79	2.1	2.68	1.66	1.561
Коэффициент линейного расширения ( $10^{-6} \text{K}^{-1}$ )	5.75	2.33	4.5	8.0	5.6 ( $\parallel$ оси C)	1.0

Примечание. \* — температура перехода алмаза в графит.

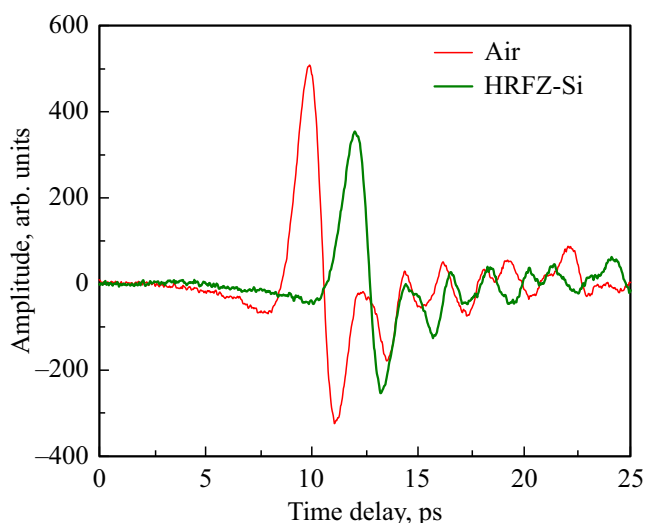


Рис. 3. THz сигналы, прошедшие через воздух и высокоомный кремний [23].

Высокоомный кремний имеет сравнительно низкие потери в THz диапазоне. На рис. 3 видно, что форма THz сигнала, прошедшего через воздух, и форма сигнала, прошедшего через высокоомный кремний, идентичны. Это свидетельствует об отсутствии значительного поглощения в кремнии. Основные потери на пропускание вызваны в основном френелевским отражением. Коэффициент поглощения высокоомного кремния в терагерцовом диапазоне 0.25 THz–2 THz менее  $0.5 \text{ cm}^{-1}$ .

Для дальней ИК и THz областей обычно используется высокоомный кремний, выращенный методом зонной плавки, обеспечивающий 50–54% пропускания в диапазоне от 50 до  $1000 \mu\text{m}$  (и более, вплоть до  $8000 \mu\text{m}$ ).

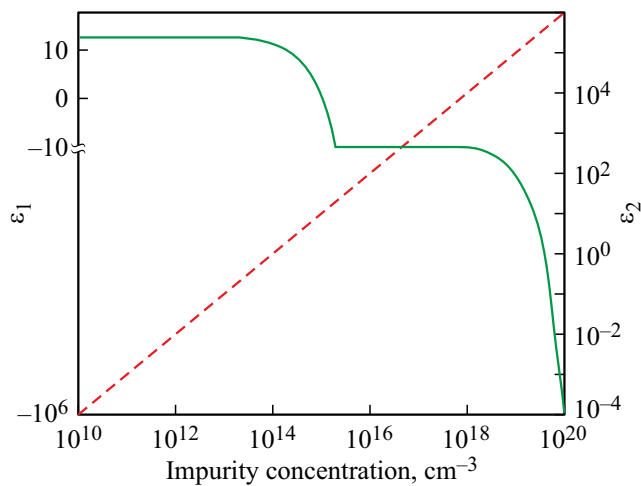
Обычно такой кремний имеет удельное сопротивление  $\sim 10 \text{ k}\Omega \cdot \text{cm}$  [2,3,29,30]; в работах [31,32] сообщается о получении кремния с удельным сопротивлением до  $50 \text{ k}\Omega \cdot \text{cm}$ . В работах [30,32] сообщается о рекордно низких потерях в кремнии, компенсированном золотом: в THz-диапазоне в лучших образцах зафиксированы потери на уровне  $\text{tg } \delta \sim 3 \cdot 10^{-6}$ .

Комплексная диэлектрическая проницаемость кремния зависит от его проводимости, т.е. от концентрации свободных носителей. На рис. 4 представлена зависимость диэлектрической проницаемости кремния от концентрации примесей ( $f = 1 \text{ THz}$ ). При низкой концентрации свободных носителей диэлектрическая проницаемость является действительной величиной и эквивалентна высокочастотной диэлектрической проницаемости.

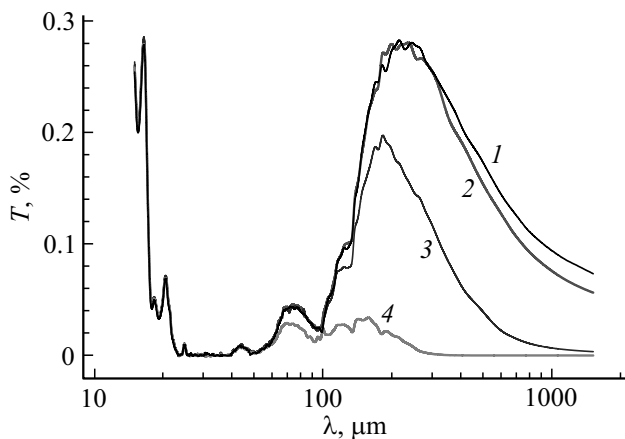
С увеличением концентрации свободных носителей действительная часть диэлектрической постоянной становится отрицательной, а ее мнимая часть перестает быть пренебрежимо малой. Благодаря этому потери в кремнии в THz диапазоне возрастают. Тангенс угла потерь может быть рассчитан по следующей формуле:  $\tan \delta = 1/(\omega \epsilon_v \epsilon_0 R)$ , где  $\omega$  — угловая частота,  $\epsilon_v$  — диэлектрическая константа вакуума ( $8.85 \cdot 10^{-12} \text{ F/m}$ ),  $\epsilon_0$  — диэлектрическая проницаемость кремния (11.67) и  $R$  — удельное сопротивление. Например, тангенс угла потерь высокоомного кремния с удельным сопротивлением  $10 \text{ k}\Omega \cdot \text{cm}$  при частоте 1 THz равен  $1.54 \cdot 10^{-5}$ .

## 1.2. Германий (Ge)

В инфракрасной технике [33–36] германий применяется для изготовления оптических деталей приборов и устройств различного назначения. Это изделия в виде защитных окон, линз, акустооптических элементов



**Рис. 4.** Действительная (сплошная линия,  $\epsilon_1$ ) и мнимая (штриховая линия,  $\epsilon_2$ ) части диэлектрической проницаемости кремния с различной концентрацией свободных носителей при частоте 1 THz [23].



**Рис. 5.** Оптическое пропускание монокристаллического германия: нелегированного — (кривая 1), легированного сурьмой (2–4); удельное электросопротивление: 2 — 46 Ом·см; 3 — 20 Ом·см; 4 — 5 Ом·см [39].

(оптические приборы наземного, морского, воздушного базирования, для космических аппаратов). Основным потребителем германия в оптике — тепловизионные камеры диапазона длин волн 8–14  $\mu\text{m}$ , используемые в системах пассивного тепловидения, системах инфракрасного наведения, приборах ночного видения, противопожарных системах. Германий также применяется для изготовления высокоэффективных фотоэлектрических преобразователей (солнечные батареи) и используется в качестве детекторов в датчиках ионизирующих и ИК излучений. Обычно применяют монокристаллический германий, но в случае, когда потери на поглощение не существенны и оптика не связана с формированием изображений, используют более дешевый поликристаллический материал.

В THz диапазоне представляет интерес использование германия для изготовления активных элементов акустооптических устройств [37]. Германий также может применяться в многоспектральных тепловизионных приборах ИК + THz диапазонов [33] и в лазерах THz диапазона, накачиваемых CO<sub>2</sub>-лазером.

В отличие от ИК-диапазона, в котором минимальное поглощение  $\sim 0.02 \text{ cm}^{-1}$  (для  $\lambda = 10.6 \mu\text{m}$ ), наблюдается в кристаллах *n*-типа проводимости 5–10 Ом·см, в THz области минимальные потери имеют место в собственных кристаллах (нелегированных или особо чистых). С увеличением длины волны из-за поглощения на свободных носителях потери возрастают (рис. 5) [35,37–39]. В области 160–220  $\mu\text{m}$  коэффициент ослабления Ge  $\sim 0.5 \text{ cm}^{-1}$ , что сопоставимо с Si [39]. На длине волны 140  $\mu\text{m}$  зафиксированы коэффициенты ослабления германия 0.75–1.04  $\text{cm}^{-1}$ , полученные на основе измерений, выполненных с использованием лазера на свободных электронах [37,38].

### 1.3. Карбид кремния (SiC)

Сравнительно новым THz материалом является карбид кремния, но его применение тормозится труднодоступностью высококачественных монокристаллических образцов. Это широкозонный полупроводник, имеющий более 200 политипов, но лишь три из них с максимальной шириной запрещенной зоны имеют реальные перспективы использования в THz технике. Наиболее интересны 3H-SiC и 6H-SiC с шириной запрещенной зоны 2.36 eV и 3.03 eV, соответственно [40–42].

Основная область применения SiC в THz области — окна ввода-вывода энергии уровня мощности 50–500 kW [40–42]. Этот материал несколько уступает алмазу, но алмаз пока значительно дороже.

В работах [40–42] исследованы диэлектрические потери в монокристаллическом карбиде кремния политипа 6H-SiC в диапазоне частот от 6 до 380 GHz (рис. 6) и в интервале температур от 20 до 550°C. На низких частотах ( $f < 10 \text{ GHz}$ ) тангенс угла потерь  $\sim 1/f$ . При  $f > 50 \text{ GHz}$  потери возрастают с ростом частоты. В низкотемпературном диапазоне ( $T = 20\text{--}250^\circ\text{C}$ ) тангенс угла потерь квазилинейно возрастает с ростом температуры (рис. 7). При  $T > 300^\circ\text{C}$  потери возрастают экспоненциально.

### 1.4. Кристаллический кварц

Диапазон оптической прозрачности кристаллического кварца в видимой и ближней ИК областях спектра достаточно широк и определяется областью длин волн 0.15–4  $\mu\text{m}$ . Хорошее пропускание материала, начиная со 100  $\mu\text{m}$ , позволяет использовать его и в THz области спектра.

Синтетический кристаллический кварц выращивается в автоклавах методом гидротермального синтеза на

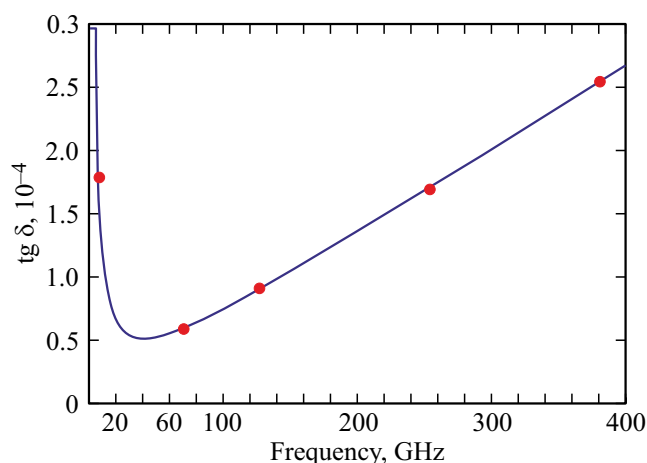


Рис. 6. Зависимость  $\text{tg } \delta$  от частоты для кристалла политипа 6H-SiC [41].

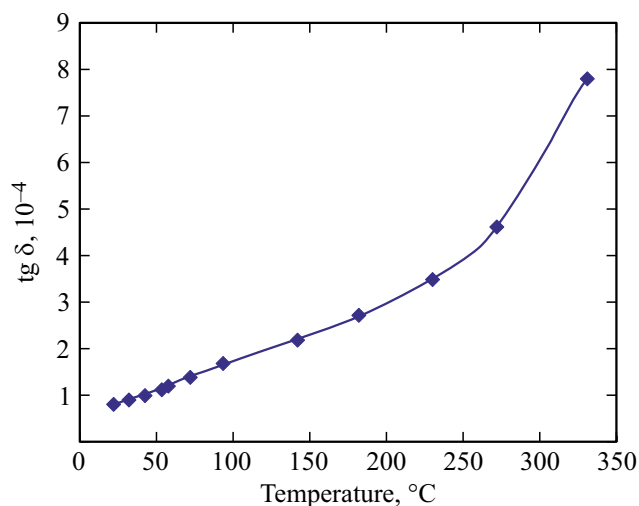


Рис. 7. Температурная зависимость  $\tan \delta$  в диапазоне температур 20–350 °C. [41].

заранее приготовленных и специальным образом ориентированных затравочных пластинах (затравках) [43,44]. Ростовой цикл продолжается несколько месяцев при строго выдерживаемых и круглосуточно контролируемых температуре порядка 400 °C и давлении до 1000 atm. Ориентация затравок определяет расположение кристаллографических осей выращиваемого кристалла.

Кристаллический кварц является анизотропным одноосным кристаллом с тригональной структурой. Кристаллическая структура имеет каркасный тип и построена из кремний-кислородных тетраэдров, расположенных винтообразно (с правым или левым ходом винта) по отношению к главной оси кристалла. В зависимости от этого различают правые и левые структурно-морфологические формы кристаллов кварца. Отсутствие плоскостей и центра симметрии обуславливает наличие у кристаллического кварца пьезоэлектрических и пироэлектрических свойств. Материал обладает выраженным

двулучепреломлением и высокой объемной однородностью показателя преломления. На рис. 8 показано пропускание кристаллического кварца толщиной 1 mm в THz диапазоне.

Кристаллический кварц широко применяется в радиотехнике, электронике, оптоэлектронике и приборостроении, используется для создания высокоточных и ответственных оптических компонентов для лазерной, поляризационной и спектральной оптики благодаря следующим отличительным свойствам:

- высокой оптической однородности и внутреннему кристаллографическому совершенству;
- относительно высокой твердости, которая сама по себе обеспечивает хорошую обрабатываемость материала и износостойкость рабочих поверхностей в процессе эксплуатации;
- высокой химической стойкости к воздействию окружающей среды;
- нерастворимостью в воде и других растворителях;
- низкому коэффициенту теплового расширения;
- хорошим диэлектрическим характеристикам, в том числе в широких частотном и температурном диапазонах и в сильных электрических полях;
- широким диапазоном оптического пропускания;
- устойчивости к действию мощного лазерного (в том числе УФ) излучения.

Отдельно следует сказать, что указанные выше свойства вместе с высоким пропусканием в УФ, делают кристаллический кварц уникальным материалом для создания оптических компонент для целого ряда приборов, устройств и сложных систем, работающих в УФ диапазоне.

Окна, изготовленные из такого кварца, обладают такими важными свойствами, как прозрачность в видимом диапазоне длин волн, что позволяет легко юстировать оптическую систему с помощью гелий-неонового лазера;

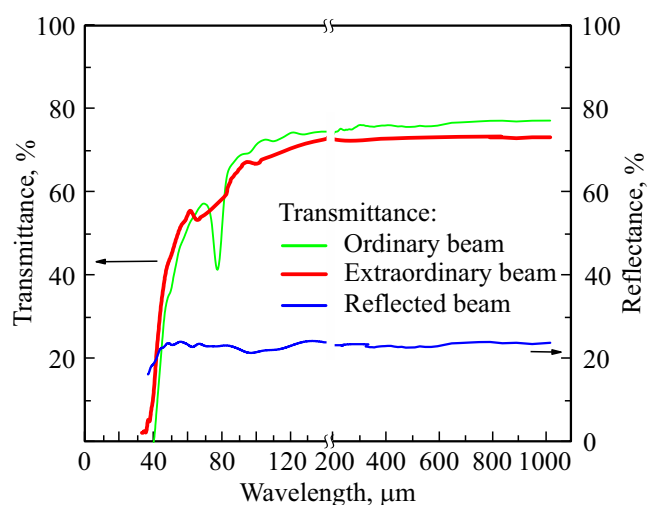
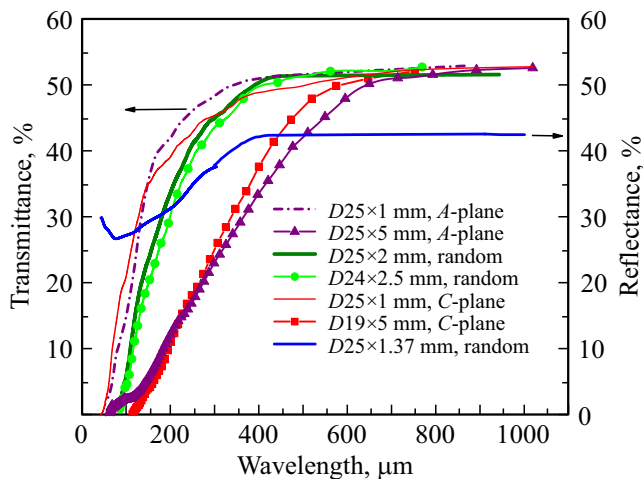


Рис. 8. Пропускание кристаллического кварца толщиной 1 mm [44].



**Рис. 9.** Пропускание образцов сапфира различной толщины и кристаллографической ориентации [46].

не изменяют состояние линейной поляризации луча; могут охлаждаться ниже  $\lambda$ -точки жидкого гелия.

Благодаря довольно большой дисперсии линзы из кристаллического кварца будут иметь различные фокальные длины в видимом и THz диапазонах. Это следует принимать во внимание в случае настройки оптических систем с такими линзами.

Поскольку кристаллический кварц является двулучепреломляющим материалом, это следует учитывать, если важна поляризация излучения. X-срезанный материал используется для производства  $\lambda/2$  и  $\lambda/4$  волновых пластинок для работы на T-волнах.

### 1.5. Сапфир ( $Al_2O_3$ )

Сапфир (корунд) широко применяется в оптике, в электронной, оптоэлектронной и лазерной технике [45,46]. Он является анизотропным одноосным кристаллом. Это один из наиболее твердых и прочных синтетических материалов. Он обладает химической инертностью и низким коэффициентом трения. Износостойкость корунда в 8 раз выше, чем у стали. Являясь диэлектриком и термически стабильным материалом вплоть до  $1600^\circ C$ , сапфир обладает также отличными оптическими свойствами — прозрачностью в УФ, в видимой и ИК областях, от  $0.17$  до  $5.5 \mu m$ . Сапфир прозрачен и в THz области (рис. 9). Видно, что в пределах точности измерений пропускание сапфира не зависит от его кристаллической ориентации. Для измеренных образцов с толщиной от 1 до 5 mm пропускание ниже  $600 \mu m$  сильно зависит от толщины образца. Пропускание приближается к насыщению для более тонких образцов при более коротких длинах волн.

Перечисленные качества сапфира делают его незаменимым материалом для работы в жестких условиях: при высокой температуре и/или давлении, в кислотном или щелочном окружении, когда требуется химическая

стойкость, а также при высоких механических нагрузках. Даже в этих тяжелых условиях сапфир не теряет своих оптических свойств.

Подобно высокоомному кремнию, сапфир используют для изготовления фотопроводящих антенн для THz.

### 1.6. Поликристаллический алмаз

Алмаз — кристалл, известный с древнейших времен [24,25], но в технике применяется сравнительно недавно. Попытки использовать алмазы в различных технических устройствах предпринимались достаточно давно, однако природные алмазы слишком дороги, малы размером и имеют значительный разброс параметров, вызванный различием в процессе их роста в природных условиях. Уникальные свойства алмаза определяются его кристаллической структурой — алмаз благодаря минимальному межатомному расстоянию имеет крайне высокое значение энергии кристаллической решетки.

Стабильной кристаллической структурой для атомов углерода является гексагональная, и эта модификация известна, как графит. В природе кристаллизация углерода в кубическую структуру алмаза происходит при очень высоких значениях температуры ( $\geq 2000^\circ C$ ) и давления ( $\geq 15$  GPa). В середине XX века была создана промышленная технология получения искусственных монокристаллов алмаза, воспроизводящая природные условия. Такие кристаллы нашли настолько многочисленные применения в различных отраслях техники, что „экономический потенциал наиболее развитых государств в значительной мере стали связывать с использованием ими алмазов“. К сожалению, технология настолько технически сложна, что получение монокристаллов более 8 карат ( $\sim 1.6$  g) не рентабельно.

В 1956 г. Спицын Б.В. и Дерягин Б.В. предложили принципиально новую технологию получения алмазов, приемлемую технологически и экологически — плазмохимическим осаждением при давлении менее 1 atm. Этот процесс часто называют CVD-технологией (chemical vapor deposition). Доступно исходное сырье — метан и водород [25,47]. В настоящее время уже получены пластины поликристаллических алмазов (ПА) диаметром до 300 mm. Основные технические характеристики ПА соответствуют свойствам природных алмазов, причем в отличие от последних они технологически воспроизводимы. Позднее выяснилось, что метод позволяет получать и достаточно крупные монокристаллы даже ювелирного качества [48].

Алмаз — конструкционный материал силовой оптики и электроники, сочетающий в себе удивительные физико-химические свойства. Будучи прозрачным от УФ вплоть до mm-диапазона (за исключением области фоновонного поглощения  $2-6 \mu m$ ) (рис. 10) он обладает уникальной теплопроводностью — в 5 раз выше, чем у меди, и низким коэффициентом термического расширения, как у инвара. Эти свойства позволяют алмазу

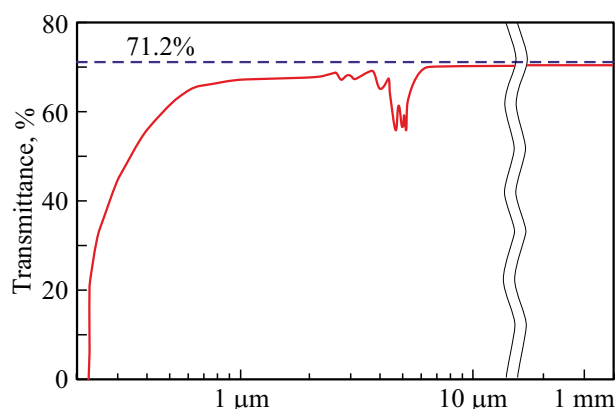


Рис. 10. Спектр пропускания пластины ПА толщиной 1 mm [25].

выдерживать лучевые нагрузки, заметно большие, чем выдерживаемые другими материалами ( $5\text{--}10\text{ MW/cm}^2$  при  $\lambda = 1.07\ \mu\text{m}$ ) [24,49,50]. Для применения в сравнительно маломощных источниках обычно используют полимерные материалы, но в мощных излучателях их использовать нельзя. Безальтернативным материалом для окон входа-выхода мощных электровакуумных и газоразрядных источников является именно ПА. Окно из ПА  $\varnothing 40\text{ mm}$  используется в Новосибирском лазере на свободных электронах со средней мощностью 400 W [20].

В качестве излучателей мощного электромагнитного излучения миллиметрового диапазона широко используются гиротроны [25,50]. Неотъемлемым элементом их конструкции является выходное окно между рабочей зоной прибора и атмосферой, что вынудило при разработке гиротронов уделить значительное внимание исследованиям оптических материалов, прозрачных в этом диапазоне. Выяснилось [25,50], что алмаз в этой области обладает минимальными потерями. Тангенс угла потерь (на частоте  $\nu = 170\text{ GHz}$ ) —  $\text{tg } \delta = 10^{-5}$ , что соответствует коэффициенту поглощения  $\sim 10^{-3}\text{ cm}^{-1}$ , причем эта величина на 3–4 порядка ниже теоретической [51]. Рекордная теплопроводность алмаза  $\sim 2000\text{ W/m} \cdot \text{grad}$  позволяет охлаждать окно при мегаваттных нагрузках [25,50]. В гиротронах со средней мощностью  $\sim 1\text{ MW}$  ( $\lambda \sim 3\text{ mm}$ ) применяются окна из ПА  $\varnothing 100\text{ mm}$  и толщиной 1.2 mm.

### 1.7. Йодистый цезий (CsI) и бромид-йодид таллия (KPC-5)

Обычно в ИК спектроскопии используются приборы диапазона  $2.5\text{--}50\ \mu\text{m}$ . В них используются диэлектрические кристаллы CsI и KPC-5, так как только они прозрачны в области  $30\text{--}50\ \mu\text{m}$ . Промышленность выпускает крупногабаритные монокристаллы твердых растворов TlBr-TlI (KPC-5) и кристаллы CsI. Вследствие высокой

пластичности и малой твердости, эти кристаллы весьма сложны в эксплуатации.

Кристаллы CsI отличаются низкой твердостью, высокой гигроскопичностью, плохими теплофизическими свойствами. Они весьма пластичны. Крупногабаритные кристаллы CsI выпускаются промышленностью для оптики дальнего ИК диапазона и для изготовления сцинтилляторов частиц высоких энергий.

KPC-5 во многом идентичен по своим физико-химическим свойствам CsI, однако в оптике применяется чаще, из-за несколько лучших механических и климатических свойств. Кристаллы KPC-5 благодаря весьма высоким фотоупругим константам применяются для изготовления акустооптических элементов. Их применение ограничивается высокой токсичностью, пластичностью, плохими механическими, теплофизическими свойствами.

Эти кристаллы прозрачны в THz области (рис. 11). Их достоинством является низкий показатель преломления (для CsI  $n = 1.74$ , а для KPC-5  $n = 2.35$ ; данные для  $\lambda = 10.6\ \mu\text{m}$ ) и вследствие этого высокое пропускание. Однако из-за низких механических свойств приходится использовать гораздо более толстые детали.

## 2. Полимеры

Среди большого разнообразия полимеров есть некоторые, имеющие отличную прозрачность для THz волн. Большим достоинством полимеров в отличие от кристаллов является малый показатель преломления ( $n \sim 1.4\text{--}1.5$ ), благодаря которому они обладают значительно меньшими потерями на отражение. Наилучшими материалами в этом смысле являются полиметилпентен (TPX), полиэтилен (PE) и политетрафторэтилен (PTFE, фторопласт или тефлон) [23,52].

Основные физические свойства полимеров приведены в табл. 2.

При больших длинах волн пропускание этих полимеров слабо зависит от длины волны, отсутствуют полосы

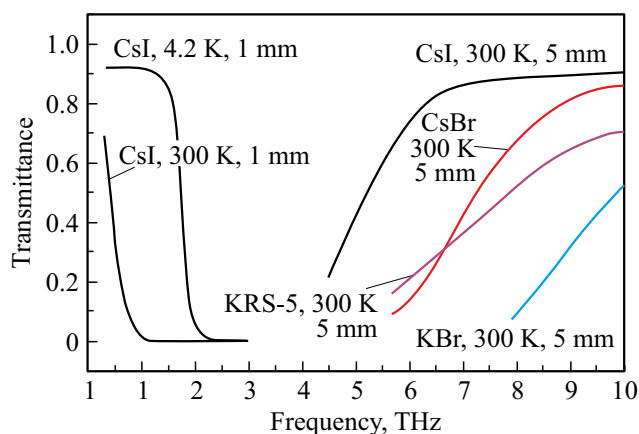


Рис. 11. Оптическое пропускание галогенидов при температурах 4.1 и 300 K [2].



**Таблица 2.** Основные свойства полимеров [23,52]

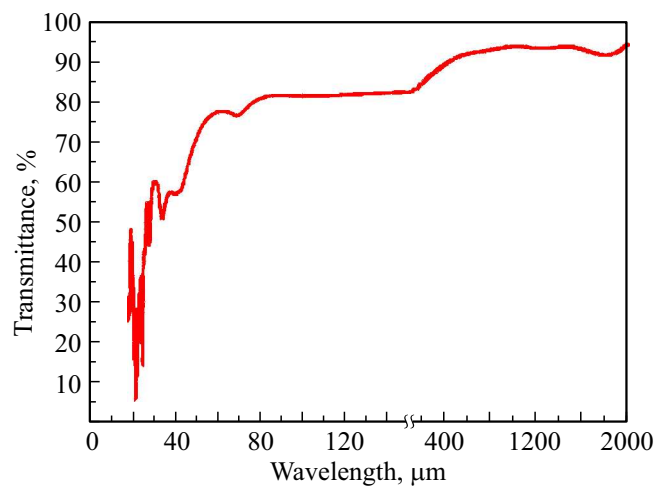
Материал	TPX	Полиэтилен	Тефлон
Плотность, g/cm <sup>3</sup>	0.83–1.08	0.91–0.925	2.2
Показатель преломления	1.46	1.54	1.43
Температура плавления, °C	235–240		327
Термостойкость, °C	–60–180	До 110	–73–204
Модуль упругости (при 23°C), МПа	690–1700	118–350	480–628
Предел текучести при растяжении (при 23°C), МПа	14–25	8–13	14–30

поглощения. При коротких длинах волн, главным образом ниже 200 мкм, наблюдаются характерные полосы поглощения, связанного с собственными колебаниями, а также увеличивается рассеяние на разного рода неоднородностях. Пропускание излучения полимеров обычно снижается в диапазоне более коротких длин волн, хотя TPX является исключением.

**2.1. Полиметилпентен (TPX)**

Полиметилпентен — прозрачный полукристаллический полимер, обладающий очень хорошими электроизоляционными свойствами.

Полиметилпентен (точнее поли-4-метилпентен-1) — кристаллизующийся материал с высокой прозрачностью: его светопропускание достигает 94%, мутность от 0.7%. В отличие от своего ближайшего „родственника“ полипропилена, прозрачность которого обеспечивается за счет уменьшения размеров кристаллических образований при добавлении нуклеатора, полиметилпентен остается прозрачным и при больших размерах кристаллитов. Это объясняется очень близкими значениями плотности и коэффициента преломления его аморфной и кристаллической фазы. Полиметилпентен — очень легкий материал, у TPX самая низкая плотность среди всех пластиков. Он имеет очень низкий показатель водопоглощения, стабилен в размерах. Обладает хорошей стойкостью к спиртам и большинству органических и неорганических растворителей, стоек к воде и может подвергаться стерилизации. TPX присуща хорошая жесткость, твердость и ударная вязкость. TPX обладает стойкостью к образованию трещин, хорошо поддается механической обработке и полировке. Чаще всего данный материал рекомендуется к применению там, где крайне важно сочетание таких свойств, как отличная прозрачность и хорошие механические свойства. В основном применяется в машиностроении, медицинских технологиях, приборостроении, в том числе и в точном приборостроении, электротехнике и пищевой промышленности. Нашел широкое применение в автомобильной промышленности, при изготовлении бытовой техники, в микроволновых технологи-



**Рис. 12.** Пропускание TPX окна толщиной 2 mm. THz диапазон [23].

ях и оптических технологиях. TPX также присущи хорошая термическая стабильность, стойкость к ползучести и хорошая стойкость к гамма- и рентгеновскому излучению. TPX имеет отличную термостойкость и сопротивляемость к большинству органических и неорганических коммерчески доступных химикатов.

Оптические свойства TPX приведены на рис. 12–14.

Он прозрачен в УФ, видимом и дальнем инфракрасном диапазонах, что, например, позволяет использовать красный лазерный луч для юстировки оптических систем. Оптические потери в материале очень низкие вплоть до миллиметровых волн. Показатель преломления полимера практически не зависит от длины волны.

TPX - твердый прочный материал, который может быть механически превращен в различные оптические компоненты, такие как линзы и окна. TPX удобен для использования в качестве окон газовых молекулярных лазеров, оптически накачиваемых CO<sub>2</sub>-лазером, вследствие прозрачности во всем THz диапазоне и абсолютного подавления излучения накачки в окрестностях 10 мкм. Также TPX окна могут быть использованы в кристатах

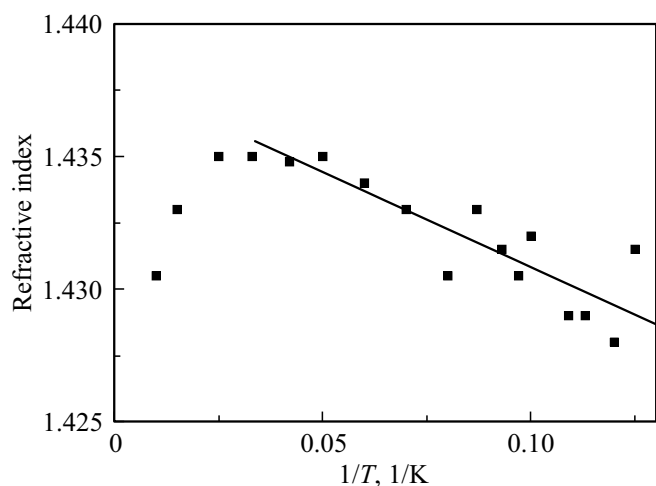


Рис. 13. Температурная зависимость показателя преломления TPX [23].

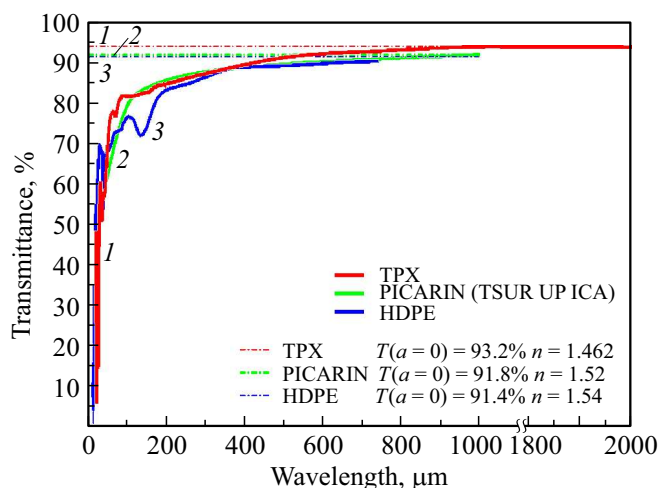


Рис. 14. Пропускание образцов TPX, пикарина и HDPE (полиэтилена высокой плотности) [23].

в качестве „холодных“ окон. Пропускание TPX в THz диапазоне не зависит от температуры. Температурный коэффициент показателя преломления —  $3.0 \cdot 10^{-4} \text{ K}^{-1}$  (для диапазона температур 8–120 К).

По сравнению с другими материалами, используемыми для работы в THz диапазоне, TPX демонстрирует отличные оптические свойства и может служить хорошей заменой новому THz материалу под названием пикарин (цурупика) при изготовлении линз. Последний коммерчески малодоступен и существенно дороже.

## 2.2. Полиэтилен (PE)

PE используют для выпуска пленки и различных пленчатых изделий: термопленки, пакеты. Пищевой PE обладает прекрасными диэлектрическими характеристиками. Одним из его достоинств является химическая стойкость, за исключением жиров и масел, которые

его растворяют. Внешне почти полностью прозрачный и слабопластичный материал, отличный электроизолятор, морозоустойчив, не подвержен радиации, влаги и газонепроницаемый. Изделия из него используют в электротехнике, химическом и пищевом производстве, автомобилестроении, строительстве и пр.

Показатель преломления слабо меняется в широком диапазоне длин волн. Оптические свойства PE приведены на рис. 15, 16. Обычно для производства оптических компонентов используется полиэтилен высокой плотности (HDPE). Тонкие пленки HDPE используются в THz поляризаторах. Также HDPE используется в качестве окон при производстве детекторов Голея.

К сожалению, пропускание HDPE в видимом диапазоне очень низкое, поэтому для настройки оптических систем приходится использовать ИК излучение.

Следует отметить, что пропускание HDPE в THz диапазоне не зависит от температуры, что позволяет использовать материал в кристаллах. Температурный

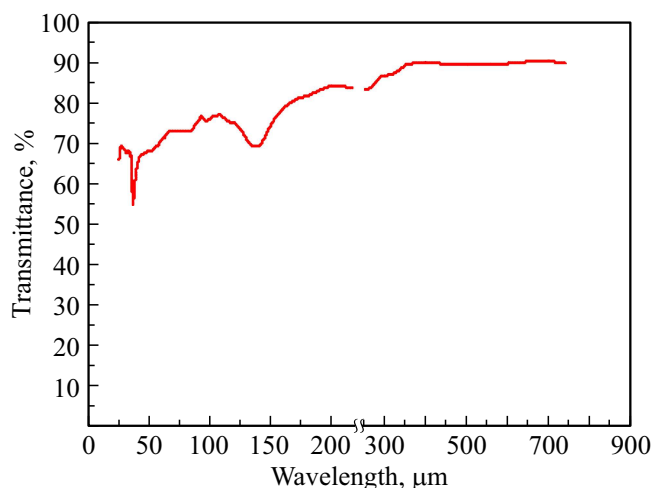


Рис. 15. Пропускание HDPE окна толщиной 2 мм. THz диапазон [23].

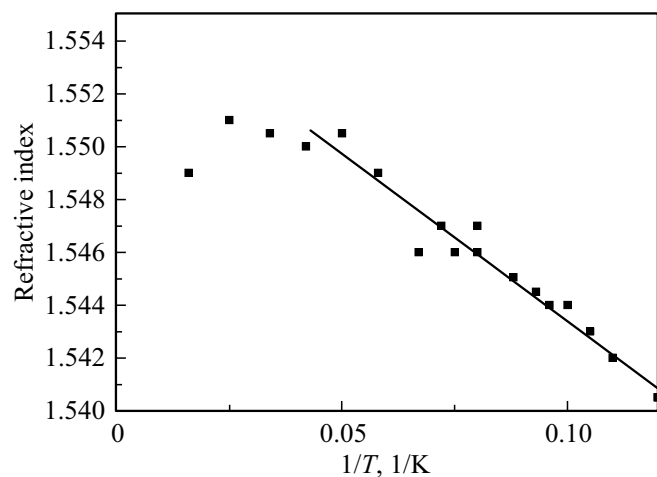
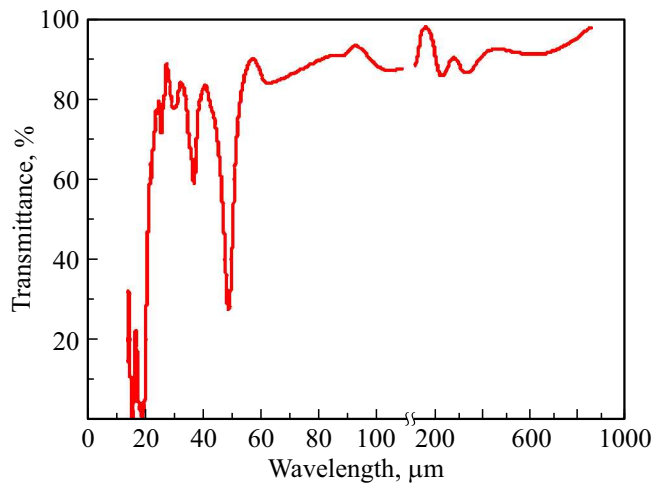


Рис. 16. Температурная зависимость показателя преломления HDPE [23].



**Рис. 17.** Пропускание пленки PTFE толщиной  $\sim 0.1$  мм в THz диапазоне [23].

коэффициент показателя преломления —  $6.2 \cdot 10^{-4} \text{ K}^{-1}$  (для диапазона температур 8–120 K).

### 2.3. Политетрафторэтилен (PTFE, тефлон, фторопласт)

PTFE — это белый, твердый и тяжелый пластик. Оптические свойства фторопласта показаны на рис. 17. Фторопласт — белое, в тонком слое прозрачное вещество, по виду напоминающее парафин или полиэтилен. Обладает высокой тепло- и морозостойкостью, прекрасный изоляционный материал. Тефлон обладает очень низкими поверхностным натяжением и адгезией и не смачивается ни водой, ни жирами, ни большинством органических растворителей.

Фторопласт является изолятором тока, прекрасным антифрикционным и достаточно термостойким полимером, что позволяет применять его в узлах трения без дополнительной смазки. Из фторопласта также делают прокладки и шайбы, и стыкуемые детали никогда не „прихватывает“. Детали из фторопласта склеиваются только при обработке склеиваемых поверхностей специальными составами, но даже в этом случае качество адгезии не очень высокое.

## Заключение

Выбранные органические материалы: TPX, PE и PTFE имеют однородное стабильное пропускание около 80–90%, начиная с  $\sim 200 \mu\text{m}$  и до 1000–2000  $\mu\text{m}$ . Безусловно, они также отлично пропускают и при больших длинах волн. Однако оптическая стойкость полимерных материалов обычно ниже, чем у кристаллов.

Кристаллические материалы, такие как кремний, германий, кварц и сапфир имеют более низкое пропускание в THz диапазоне вследствие потерь на отражение. Для

германия это 35–40% (в диапазоне 80–300  $\mu\text{m}$ ), алмаза — это 70–71%, кремния — это 50–54%, начиная с 50  $\mu\text{m}$ , для кварца — это  $> 70\%$ , начиная с  $\sim 120 \mu\text{m}$ , для сапфира  $> 50\%$ , начиная с  $\sim 350 \mu\text{m}$  для образцов 1–2 мм толщины. Причем в этих материалах (кроме алмаза) коэффициент поглощения составляет величину  $\alpha \sim 0.5 \text{ cm}^{-1}$ . В алмазе  $\alpha \sim 10^{-3} \text{ cm}^{-1}$ , что выше теоретического предела на 3–4 порядка.

Рассмотренные выше материалы обладают значительным, с точки зрения лазерной техники, поглощением  $\sim 0.5 \text{ cm}^{-1}$  и более, что ограничивает их использование в мощных лазерных системах. В маломощных системах возможно их применение в виде тонких пластин или пленок. Но в этом случае необходимо учитывать интерференционные эффекты, так как зачастую толщина оптического элемента может оказаться соизмеримой с длиной волны.

По выходной энергии излучения все приборы целесообразно разделить на две группы (менее миллиджоуля и более). Для первой группы излучателей возможно использование не только кристаллов, но и полимеров. Для более мощных излучателей рекомендуется применение кристаллических материалов.

Применение кристаллических материалов, имеющих большой показатель преломления, осложняется значительным френелевским отражением. Традиционный в оптике способ его уменьшения путем нанесения интерференционных покрытий в THz диапазоне почти не применим, так как для просветления необходимы слои, кратные  $\lambda/4$ , что технологически возможно только в случае нанесения пленки органического материала, что пока широко не применяется. Однако для THz области возможно просветление путем создания на поверхности периодических рельефных структур с высокой степенью регулярности и периодом меньше длины волны излучения. В этом случае большая длина волны излучения заметно снижает технологические проблемы изготовления.

В последнее время появился сравнительно новый оптический материал — поликристаллический алмаз. Он обладает хорошими оптическими свойствами, и для мощных источников THz диапазона этот материал безальтернативен [24,25,50]. В THz диапазоне в настоящее время известны два источника мощного излучения, использующие алмазное окно. В коротковолновой части диапазона это лазер на свободных электронах, излучающий на длинах волн 120–240  $\mu\text{m}$  частотно-импульсное излучение со средней мощностью 400 W, а в длинноволновой части THz диапазона это гиротрон [20,50]. Эти два столь несхожих прибора объединяет одно: излучение из них выходит через алмазное окно. Также силовые алмазные оптические элементы могут быть использованы в нелинейно-оптических устройствах, работающих за счет выделения волны с разностной частотой. Для менее мощных источников может быть рекомендован карбид кремния.

## Список литературы

- [1] *Си-Чен Чжан, Джингдэсю Шю*. Терагерцовая фотоника. Москва-Ижевск: ИКИ, 2016. 334 с.; *Xi-Cheng Zhang, Jingzhou Xu*. Introduction to THz Wave Photonics. Springer, 2010. doi 10.1007/978-1-4419-0978-7
- [2] *Brundermann E., Hübers H.W., Kimmit M.F.* Terahertz Techniques. Heidelberg: Springer, 2012. 383 p.
- [3] *Lee Y.S.* Principles of Terahertz Science and Technology. NY: Springer, 2009. 337 p.
- [4] *Lewis R.A.* Terahertz Physics. Cambridge: Cambridge University Press, 2012. 275 p.
- [5] *Малевиц В.Л., Симицын Г.В., Социлин Г.Б., Розанов Н.Н.* // Опт. и спектр. 2018. Т. 124. № 6. С. 844–849.
- [6] *Розанов Н.Н., Архипов М.В., Архипов Р.М., Пахомов А.В., Бабушкин И.В.* // Опт. и спектр. 2017. Т. 123. № 1. С. 105–109.
- [7] *Розанов Н.Н.* // Опт. и спектр. 2009. Т. 107. № 5. С. 761–765.
- [8] *Chang T.Y., Bridges T.J., Burkhardt E.G.* // Appl. Phys. Lett. 1970. V. 17. P. 249–251.
- [9] *Miles R.E., Harrison P., Lippens D.* Terahertz Sources and Systems (NATO Science Series, Ser. II, V. 27). Kluwer Academic Publishers, 2001. 350 p.
- [10] *Андронов А.А., Зверев И.В., Козлов В.А., Ноздрин Ю.Н., Павлов С.А., Шастин В.Н.* // Письма в ЖЭТФ. 1984. Т. 40. № 2. С. 69.
- [11] *Parshin V.V.* // Int. J. of Infrared and Millimeter Waves. 1994. V. 15. N 2. P. 339–348.
- [12] *Weber M.J.* Gas Lasers. Handbook of Lasers. Boca Raton: CRC Press LLC, 2001. 1186 p.
- [13] *Vodopyanov K.L.* // Optics Express. 2006. V. 14. N 6. P. 2263–2276.
- [14] *Bravy V.G., Chernyshev Yu.A., Gordienko V.M., Makarov E.F., Panchenko V.Ya., Platonenko V.T., Vasil'ev G.K.* // Optics Express. 2012. V. 20. N 23. P. 25536–25544.
- [15] *Веденов А.А., Мельников Г.Д., Соболенко Д.Н.* // УФН. 1982. Т. 138. № 3. С. 477–515.
- [16] *Tochitsky S.Ya., Chieh Sung, Trubnick S.E., Chan Joshi, Vodopyanov K.L.* // J. Opt. Soc. Am. B. 2007. V. 24. N 9. P. 2509–2516.
- [17] *Tochitsky S.Ya., Ralph J.E., Sung C., Joshi C.* // J. Appl. Phys. 2005. V. 98. P. 26101 (1–3).
- [18] *Haberberger D., Tochitsky S., Joshi C.* // Opt. Express. 2010. V. 18. N 17. P. 17865–17875.
- [19] *Абрамов А.С., Золотовский И.О., Минвалиев Р.Н., Семенов Д.И.* // Опт. и спектр. 2014. Т. 117. № 1. С. 100–105.
- [20] *Винокуров Н.А., Шевченко О.А.* // УФН. 2018. Т. 188. № 5. С. 493–507.
- [21] *Черномырдин Н.В., Щадько А.О., Лебедев С.П., Спектор И.Е., Толстогозов В.Л., Кучерявенко А.С., Малахов К.М., Командин Г.А., Горелик В.С., Зайцев К.И.* // Опт. и спектр. 2018. Т. 124. № 3. С. 420–428.
- [22] *Розанов Н.Н., Социлин Г.Б., Федоров С.В., Шацев А.Н., Малевиц В.Л., Симицын Г.В.* // Опт. и спектр. 2017. Т. 123. № 1. С. 132–136.
- [23] THz Materials [электронный ресурс]. Режим доступа: [http://www.tydexoptics.com/ru/products/thz\\_optics/thz\\_materials/](http://www.tydexoptics.com/ru/products/thz_optics/thz_materials/)
- [24] *Рогалин В.Е., Аранчий С.М.* // Интеграл. 2012. № 5 (67). С. 7–9.
- [25] *Ральченко В.Г., Большаков А.П.* CVD-алмаз: синтез и свойства // Углеродная фотоника / Под ред. В.И. Конова. М.: Наука, 2017. 327 с.
- [26] *Wheeler J.D., Koopman B., Gallardo P., Maloney P.R., Brugge S., Cortes-Medellin G., Datta R., Darren Dowell C., Glenn J., Golwala S., McKenney C., McMahon J.J., Munson Ch.D., Niemack M., Parshley S.G., Stacey G.* // Millimeter, Submillimeter, and Far-Infrared Detectors and Instrumentation for Astronomy VII / Ed. by Holland W.S., Zmuidzinas J. Proc. SPIE. 2014. V. 9153. 91532Z. doi 10.1117/12.2057011
- [27] *Головашкин Д.Л., Досколович Л.Л., Казанский Н.Л., Котляр В.В., Павельев В.С., Скиданов Р.В., Соифер В.А., Хонина С.Н.* Дифракционная компьютерная оптика. М.: Физматлит, 2007. 736 с.
- [28] *Soifer V.A.* Computer design of diffractive optics. Cambridge International Science Publishing Ltd. & Woodhead Pub. Ltd., 2012. 896 p.
- [29] Тидекс Кремний [электронный ресурс]. Режим доступа: [http://www.tydexoptics.com/ru/materials/for\\_transmission\\_optics/silicon/](http://www.tydexoptics.com/ru/materials/for_transmission_optics/silicon/)
- [30] *Андреев Б.А., Котерева Т.В., Паршин В.В., Шмагин В.Б., Heidinger R.* // Неорганические материалы 1997. Т. 33. № 11. С. 1–4.
- [31] *Grischkowsky D., Keiding S., van Exter M., Fattinger C.* // J. Opt. Soc. Am. B. 1990. V. 7. P. 2006–2015.
- [32] *Гарин Б.М., Копнин А.Н., Пархоменко М.П., Изынеев А.А., Сабликов В.А.* // Письма в ЖТФ. 1994. Т. 20. № 21. С. 56–59.
- [33] *Кортаев В.В., Мельников Г.С., Михеев С.В., Самков В.М., Солдатов Ю.И.* Основы тепловидения. СПб.: ИТМО, 2012. 123 с.
- [34] Тидекс Германий [электронный ресурс]. Режим доступа: [http://www.tydexoptics.com/ru/materials/for\\_transmission\\_optics/germanium/](http://www.tydexoptics.com/ru/materials/for_transmission_optics/germanium/)
- [35] *Ровинский Р.Е., Рогалин В.Е., Шершель В.А.* // Изв. АН СССР. Сер. Физ. 1983. Т. 47. № 2. С. 406–409.
- [36] *Claeys L., Simoen E.* Germanium-based technologies: from materials to devices. Berlin: Elsevier, 2007. 449 p.
- [37] *Волошинов В.Б., Никитин П.А., Герасимов В.В., Князев Б.А., Чопорова Ю.Ю.* // Квант. электрон. 2013. Т. 43. № 12. С. 1139–1142.
- [38] *Kaplunov I.A., Nikitin P.A., Voloshinov V.B., Kolesnikov A.I., Knyazev B.A.* // J. Phys.: Conf. Ser. 2016. V. 737. P. 012021.
- [39] *Каплунов И.А., Колесников А.И., Кропотов Г.И., Рогалин В.Е.* Оптические свойства монокристаллического германия в THz области спектра // Опт. и спектр. 2019. Т. 126. В печати.
- [40] *Chigryai E.E., Garin V.M., Denisuyk R.N., Kalenov D.S., Nikitin I.P.* // Журн. радиоэлектроники. 2016. N 11. С. 18.
- [41] *Паршин В.В., Серов Е.А., Денисов Г.Г., Гарин Б.М., Вьюгинов В.Н., Клевцов В.А., Травин Н.К.* // Электроника и микроэлектроника СВЧ. 2017. Т. 1. № 1 (1). С. 45–50.
- [42] *Паршин В.В., Серов Е.А., Денисов Г.Г., Гарин Б.М., Вьюгинов В.Н., Клевцов В.А., Травин Н.К.* // В сборнике: 27-я Международная Крымская конференция „СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии“ (КрыМиКо’2017). Севастополь, 2017. С. 920–925.
- [43] *Лобачев А.Н.* Гидротермальный синтез кристаллов. М.: Наука, 1968. 216 с.

- [44] Тидекс Кристаллический кварц [электронный ресурс]. Режим доступа: [http://www.tydexoptics.com/ru/materials/for\\_transmission\\_optics/crystal\\_quartz/](http://www.tydexoptics.com/ru/materials/for_transmission_optics/crystal_quartz/)
- [45] Мусатов М.И. Техника и технология выращивания кристаллов сапфира методом ГОИ. СПб.: Изд-во Политехнического ун-та, 2013. 470 с.
- [46] Тидекс Сапфир [электронный ресурс]. Режим доступа: [http://www.tydexoptics.com/ru/materials/for\\_transmission\\_optics/synthetic\\_sapphire/](http://www.tydexoptics.com/ru/materials/for_transmission_optics/synthetic_sapphire/)
- [47] Спицын Б.В., Дерягин Б.В. Способ наращивания граней алмаза. А.С. № 339134. 1956.
- [48] Ho S., Yan C.S., Liu Z., Mao H.K., Hemley R.J. // *Industrial Diamond Review*. 2006. V. 66. P. 28–32.
- [49] Rogalin V.E., Ashkenazi E.E., Popovich A.F., Ral'chenko V.G., Konov V.I., Aranchii S.M., Ruzin M.V., Uspenskii S.A. // *Russian Microelectronics*. 2012. V. 41. N 8. P. 464–468.
- [50] Garin B.M., Polyakov V.I., Rukovishnikov A.I., Parshin V.V., Serov E.A., Mocheneva O.S., Jia Ch.Ch., Tang W.Z., Lu F.X. // *NATO Science for Peace and Security Series B: Physics and Biophysics*. 2013. С. 79–87.
- [51] Гарин Б.М., Копнин А.Н., Паршин В.В., Ральченко В.Г., Чигряй Е.Е., Конов В.И., Мазур А.Б., Пархоменко М.П. // *Письма в ЖТФ*. 1999. Т. 25. № 7. С. 85–89.
- [52] Технология пластических масс. 3-изд. / Под ред. В.В. Коршака. М.: Химия, 1985. 560 с.