ТГц материалы

Терагерцовое (ТГц) излучение располагается в спектральном диапазоне ~0.1-10 ТГц (~3 мм - 30 микрон, 3 см-1 - 300 см-1) между микроволновым и дальним инфракрасным диапазонами электромагнитного спектра.

В сравнении с видимыми или инфракрасными волнами ТГц излучение может проникать в органические материалы, такие как кожа, пластики, одежда или бумага. Вследствие низкой энергии фотона оно не вызывает повреждений, связанных с ионизирующими излучениями (такими, как рентгеновские лучи, например). ТГц волны не проникают в металлы. Эти свойства могут быть использованы в текущем производственном контроле (например, при производстве лекарств), контроле качества готовой продукции, в ТГц изображении. Также представляет большой интерес использование ТГц излучения в таких приложениях, как: контроль безопасности, проверка упаковок, характеризация полупроводников, анализ химического состава, биохимические исследования.

Традиционно для ТГц приложений используется высокоомный кремний, выращенный методом зонной плавки (HRFZ-Si), как наиболее исследованное вещество, хорошо пропускающее в этом диапазоне. Параллельно с этим материалом мы исследовали другие материалы, которые по нашим представлениям могут быть использованы в ТГц диапазоне.

Ниже мы представляем спектры пропускания и другие свойства материалов, используемых нами в производстве ТГц оптики. Измерения в дальнем инфракрасном и миллиметровом диапазонах были сделаны на Фурье-спектрометрах ABB Bomem DA3 и Bruker IFS 125HR (точность измерений 2-3% ниже 100 микрон и 4-5% выше 100 микрон). Измерения в видимом и ближнем ИК-диапазонах были проведены на спектрофотометре Perkin Elmer “Lambda-9” (точность измерений <0.5%).

1. Кристаллы

Важную роль для терагерцовых применений играют такие кристаллы, как кремний, кристаллический кварц и сапфир.

1.1 Высокоомный кремний (HRFZ-Si)

За исключением синтетического алмаза, высокоомный кремний является единственным изотропным кристаллическим материалом, подходящим для чрезвычайно широкого диапазона длин волн - от ближнего ИК (1.2 микрона) до миллиметрового (1000 микрон) и более. Однако, по сравнению с алмазом, он значительно дешевле в выращивании и обработке, а также имеет значительно более крупные размеры, позволяющие разнообразить спектр производимых оптических деталей. Кремний является одним из наиболее технологичных материалов, позволяющим создавать на его базе элементы быстроразвивающейся терагерцовой фотоники.

Для ТГц компонентов мы используем высокоомный кремний, выращенный методом зонной плавки, обеспечивающий 50-54% пропускания от 50 до 1000 микрон (и более, вплоть до 8000 микрон).

Высокоомный кремний имеет низкие потери в ТГц диапазоне. Из рис. 2 видно, что форма ТГц сигнала, прошедшего через воздух, и форма сигнала, прошедшего через высокоомный кремний, идентичны. Это свидетельствует об отсутствии поглощения в кремнии.

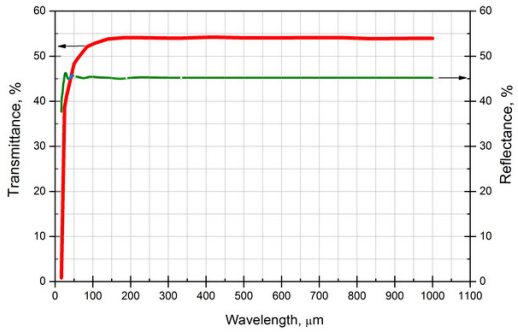

Рис. 1. Пропускание и отражение высокоомного кремния. ТГц диапазон.

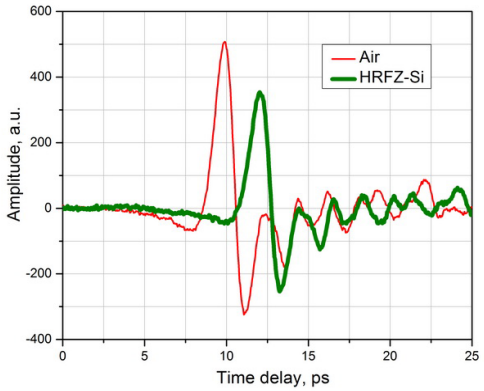

Рис. 2. ТГц сигналы, прошедшие через воздух и высокоомный кремний (*).

Комплексная диэлектрическая проницаемость кремния зависит от его проводимости, то есть от концентрации свободных носителей. На рис. 3 представлена зависимость диэлектрической проницаемости кремния от концентрации примесей (частота 1 ТГц). При низкой концентрации примесей диэлектрическая проницаемость является действительной величиной и эквивалентна высокочастотной диэлектрической проницаемости. С увеличением концентрации примесей действительная часть диэлектрической постоянной становится отрицательной, а ее мнимая часть перестает быть пренебрежимо малой.

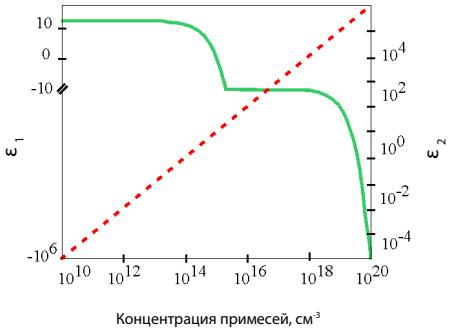

Рис. 3. Действительная (сплошная линия, ε_1) и мнимая (пунктирная линия, ε_2) части диэлектрической проницаемости кремния с различной концентрацией примесей при частоте 1 ТГц. (**)

Благодаря этому потери в кремнии в ТГц диапазоне возрастают. Тангенс угла потерь может быть рассчитан по следующей формуле: $\tan\delta=1/(\omega*\varepsilon_v*\varepsilon_0*R)$, где ω - угловая частота, εv - диэлектрическая константа вакуума ($8.85*10^{-12}$ Ф/м), ε_0 - диэлектрическая константа кремния (11.67) и R - удельное сопротивление. Например, тангенс угла потерь в высокоомном кремнии с сопротивлением 10 кОм*см при частоте 1 ТГц равен $1.54*10^{-5}$.

Домостроительная ул. 16
194292 С.-Петербург, Россия
www.tydex.ru

Тел. : 7-812-3318702
Факс: 7-812-3092958
E-mail: optics@tydex.ru

TYDEX®

Больше об общих свойствах кремния, а также спектры пропускания в БИК и СИК диапазонах можно найти в разделе Кремний.

1.2 Кристаллический кварц

Одним из наилучших материалов для длин волн выше 50 микрон является z-срезанный кристаллический кварц. Окна, изготовленные из такого 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.

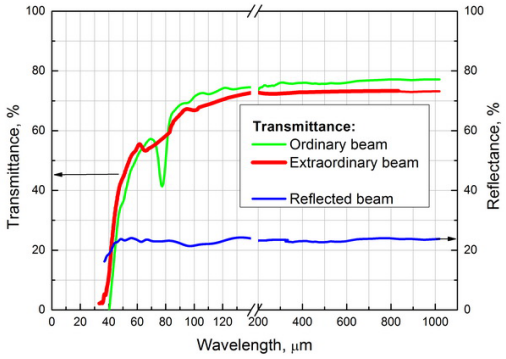

Рис. 4. Пропускание и отражение образца кристаллического кварца толщиной 1 мм.

Благодаря довольно большой дисперсии (см. таблицу ниже) линзы из кристаллического кварца будут иметь различные фокальные длины в видимом и ТГц диапазонах. Это следует принимать во внимание, если вы собираетесь использовать такие линзы для настройки оптических систем.

λ, мкм	n_o	n_e	λ, мкм	n_o	n_e
0.589	1.544	1.553	100.0	2.132	2.176
6.0	1.32	1.33	200.0	2.117	2.159
10.0	2.663	2.571	333.0	2.113	2.156
30.0	2.5	2.959			

Кристаллический кварц является двулучепреломляющим материалом, что следует учитывать, если поляризация излучения важна для Вас. Мы используем x-срезанный материал для производства λ/2 и λ/4 волновых пластинок для работы на ТГц волнах.

Больше об основных свойствах кристаллического кварца, а также спектры пропускания в УФ и видимом диапазонах Вы можете найти в разделе "Синтетический кристаллический кварц".

Плавленый кварц небольшой толщины также пропускает длинноволновое излучение. Начиная с 500-700 мкм пропускание становится как у кристаллического материала. В случае миллиметрового применения использование деталей из плавленого кварца малой толщины позволяет удешевить систему.

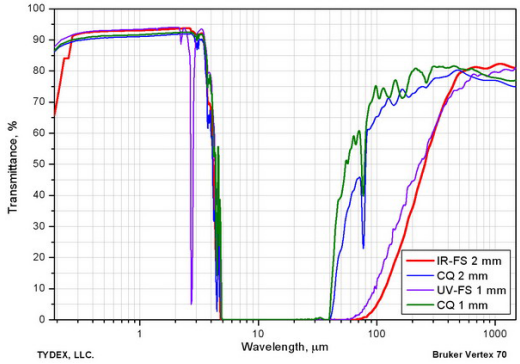

Рис. 5. Пропускание окон из кристаллического кварца, КИ и КУ-1 различной толщины.

1.3 Сапфир

Сапфир подобно кристаллическому кварцу прозрачен в субмиллиметровой области так же, как и в видимой. Как может быть видно из приведенных ниже спектров, пропускание сапфира не зависит от его кристаллической ориентации. Для измеренных образцов с толщиной от 1 до 5 мм пропускание ниже 600 микрон сильно зависит от толщины образца. Пропускание приближается к насыщению для более тонких образцов при более коротких длинах волн. Подобно высокоомному кремнию, из сапфира, имеющего близкий показатель преломления, можно изготавливать гиперполусферические линзы для ТГц детекторов и генераторов на базе фотопроводящих антенн.

Больше об общих свойствах сапфира, а также спектры пропускания в УФ и видимом диапазонах Вы можете найти в разделе нашего сайта "Сапфировая оптика".

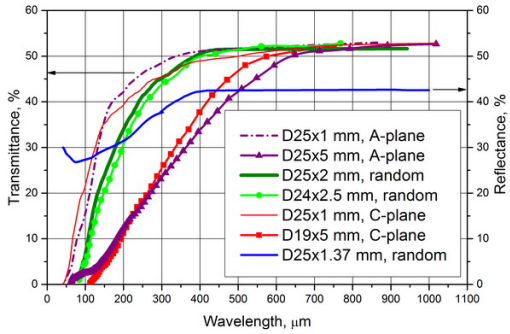

Рис. 6. Пропускание и отражение образцов сапфира различной толщины и кристаллографической ориентации

2. Полимеры

Среди большого разнообразия полимеров есть некоторые, имеющие отличную прозрачность для терагерцовых волн при низком отражении. Наилучшими материалами в этом смысле являются полиметилпентен (TPX), Picarin (Tsurupica), циклоолефиновый полимер (Zeonex), циклический олефиновый сополимер (COC), полиэтилен (PE) и политетрафлюроэтилен (PTFE, фторопласт или тефлон). От 200мкм и выше пропускание этих полимеров составляет более 80% и не зависит от длины волны, а ниже появляются характерные полосы поглощения, связанного с собственными колебаниями, а также увеличивается рассеяние на разного рода неоднородностях материала. В видимом диапазоне прозрачны TPX, Tsurupica, Zeonex и COC.

2.1 Полиметилпентен (TPX)

TPX - это легчайший из всех известных полимеров. Он прозрачен в ультрафиолете и дальнем инфракрасном, а также видимом диа-

пазоне, что позволяет использовать гелий-неоновый лазерный луч для настройки оптических систем. Его показатель преломления ~1.46, и он практически не зависит от длины волны.

λ, мкм	n	λ, мкм	n
0.633	1.463	667	1.46
24	1.4568	1000	1.4650
60	1.4559	3191	1.466
300	1.46		

Оптические потери в материале очень низкие вплоть до миллиметровых волн. ТРХ имеет отличную термостойкость и сопротивляемость к большинству органических и неорганических коммерчески доступных химикатов.

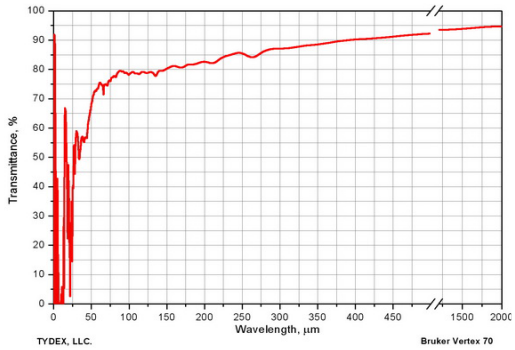

Рис. 7. Пропускание образца ТРХ толщиной 2 мм. ТГц диапазон.

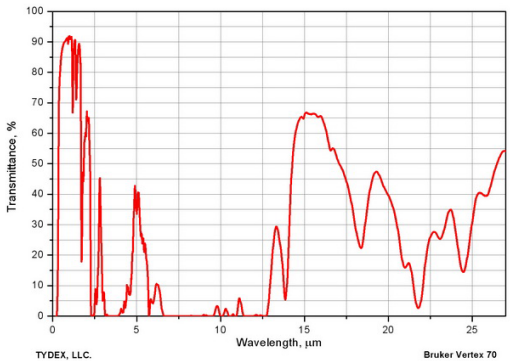

Рис. 8. Пропускание образца ТРХ толщиной 2 мм. БИК&СИК диапазоны.

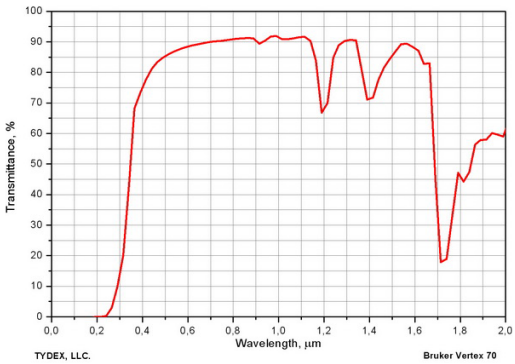

Рис. 9. Пропускание образца ТРХ толщиной 2 мм. УФ&ВИД&БИК диапазоны .

Типичные свойства ТРХ:

Плотность, г/см^3	0.83
Предел прочности на разрыв	4100 ф/кв.д (~28.3 МПа)
Модуль растяжения	280000 ф/кв.д(~1930.5 МПа)
Относительное удлинение при разрыве, %	10
Прочность на изгиб	6100 ф/кв.д (42.1 МПа)
Модуль изгиба	210000 ф/кв.д (1447.8 МПа)
Температура плавления (°F / °C)	464 / 240
Влагопоглощение (AST-D1238), %	<0.01
Влагопроницаемость, (толщина 25 мкм, 40°C, 90%RH), г/м^2*24ч	110
Кислородопроницаемость (толщина 100 мкм), см^3/м^2*24ч*МПа	120000
Модуль разрыва	6100 ф/кв.д

Отметим такое специфическое применение ТРХ, как использование его в газовых молекулярных лазерах, оптически накачиваемых CO2 лазером, в качестве выходного окна вследствие его прозрачности во всем терагерцовом диапазоне и абсолютного подавления излучения накачки в окрестностях 10 микрон. Также ТРХ окна могут быть использованы в криостатах в качестве “холодных” окон. Пропускание ТРХ в ТГц диапазоне не зависит от температуры. Температурный коэффициент показателя преломления 3,0*10^{-4} К$^{-1}$ (для диапазоне температур 8-120К).

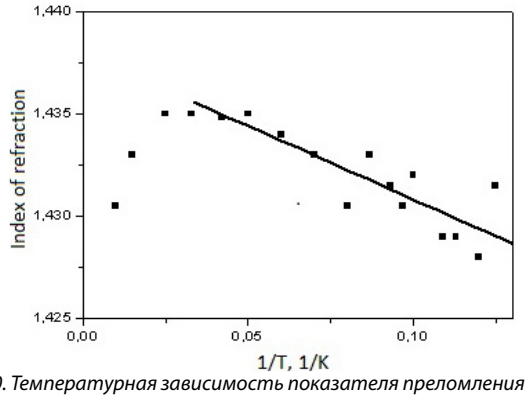

Рис. 10. Температурная зависимость показателя преломления (***).

Благодаря отличным оптическим свойствам, при изготовлении линз ТРХ служит заменой такому материалу, как пикарин (цурупика).

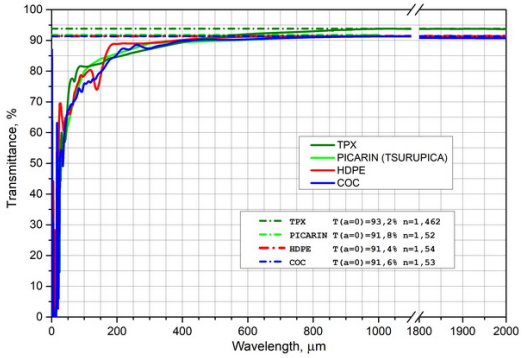

Рис. 11. Пропускание образцов ТРХ, PICARIN, HDPE и COC толщиной 2 мм.

В вакуумных применениях ТРХ окна используются до давления 10^{-9}мм рт. ст.

Домостроительная ул. 16
194292 С.-Петербург, Россия
www.tydex.ru

Тел. : 7-812-3318702
Факс: 7-812-3092958
E-mail: optics@tydex.ru

TYDEX®

2.2 ZEONEX

Вместе с тем, для ультравысокого вакуума (10^{-9}-10^{-11} мм рт. ст.) предлагается ZEONEX (циклоолефиновый полимер), который обладает отличными механическими свойствами, хорошей химической стойкостью и очень низкой дегазацией в условиях вакуума. Основные характеристики материала приведены ниже.

Типичные свойства ZEONEX:

Плотность (ASTM D792)	1.01 г/см^3
Модуль растяжения (ISO527-2)	363000 ф/кв.д
Относительное удлинение при разрыве (ISO527-2)	10 %
Прочность на изгиб (ISO178)	15100 ф/кв.д
Модуль изгиба (ISO178)	363000 ф/кв.д
Твердость (JIS K5401)	F
Температура теплового искажения (JIS D648)	122°C
Температура стеклования (JIS K7121)	139°C
Коэффициент теплового расширения (ASTM E831)	6*10^{-5}см/см°C
Влагопоглощение (ASTM D570)	<0.01%
Показатель преломления (ASTM D542)	1.531
Модуль разрыва	15100 ф/кв.д

Отсутствие дисперсии показателя преломления и прозрачность в видимом диапазоне так же, как у ТРХ, позволяет производить настройку терагерцовых оптических систем, включающих ZEONEX, с помощью гелий-неонового лазерного луча.

Отметим, что ZEONEX обладает более высоким пропусканием в видимом диапазоне по сравнению с ТРХ.

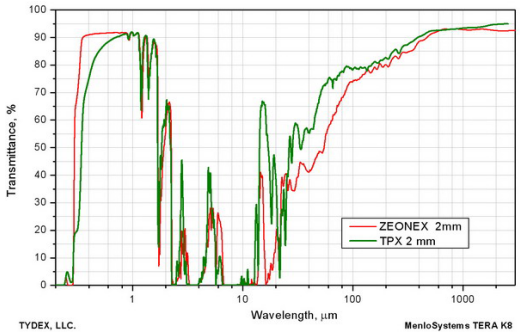

Рис. 12. Пропускание ТРХ и ZEONEX окон толщиной 2 мм.

Лучшие по сравнению с ТРХ механические свойства ZEONEX делают возможным использование этого пластика для изготовления призм.

2.3 Полиэтилен (PE)

Полиэтилен широко применяется во многих сферах благодаря доступности и относительно низкой стоимости.

Мы используем полиэтилен высокой плотности (HDPE) в качестве окон при производстве детекторов Голея.

Типичные свойства HDPE:

Плотность	0.96 г/см^3
Модуль упругости при растяжении (ISO 527)	1100 MPa
Твердость по Шору (ISO 868), шкала D	64
Предел текучести при растяжении (ISO 527-1)	43 MPA
Удлинение при растяжении (ISO 527-1)	9%
Коэффициент линейного теплового расширения (ISO 11359-1;2), $10^{-5}K^{-1}$	18
Рабочий диапазон температур (долговременно)	-50 - +80 °C
Рабочий диапазон температур (кратковременно)	+90 °C

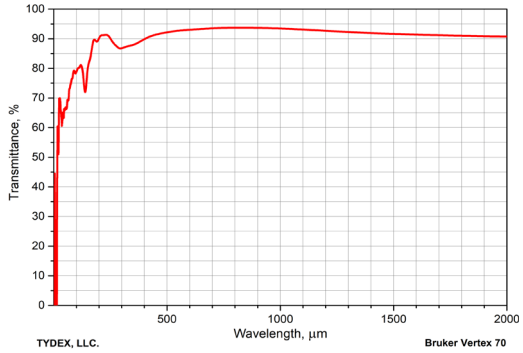

Рис. 13. Пропускание образца HDPE толщиной 2 мм. ТГц диапазон.

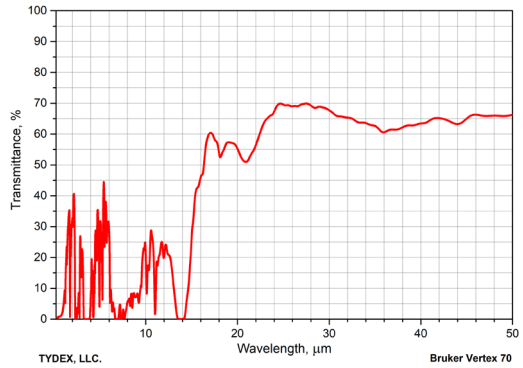

Рис. 14. Пропускание образца HDPE олщиной 2 мм. БИК&СИК диапазоны.

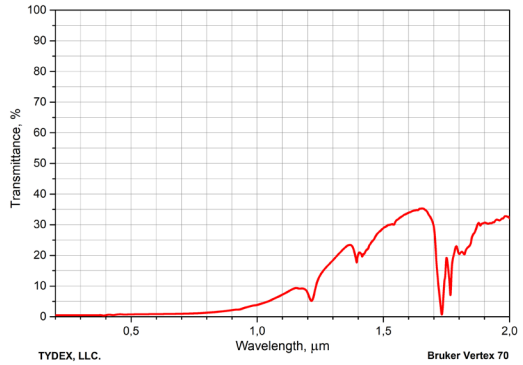

Рис. 15. Пропускание образца HDPE толщиной 2 мм. ВИД&БИК диапазоны.

К сожалению, пропускание HDPE в видимом диапазоне очень низкое, поэтому его нельзя использовать для настройки оптических систем.

Следует отметить, что пропускание HDPE в ТГц диапазоне не зависит от температуры, что позволяет использовать его при гелиевых и азотных температурах. Температурный коэффициент показателя преломления 6,2*$10^{-4}K^{-1}$ (для диапазона температур 8-120K).

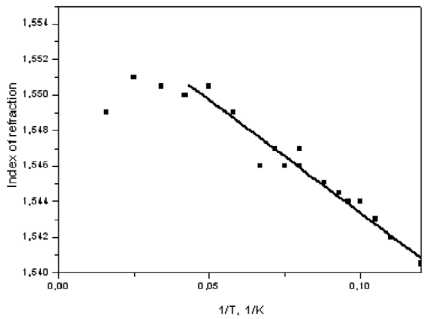

Рис. 16. Температурная зависимость показателя преломления (***)

Домостроительная ул. 16
194292 С.-Петербург, Россия
www.tydex.ru

Тел. : 7-812-3318702
Факс: 7-812-3092958
E-mail: optics@tydex.ru

ТГц материалы

В инженерии более популярен сверхвысокомолекулярный полиэтилен, т.к. он обладает лучшей износостойкостью и низким коэффициентом трения в сравнении с полиэтиленом высокой плотности.

Из всех марок полиэтилена сверхвысокомолекулярный PE 1000 (UHMWPE) проявляет наибольшую сбалансированность свойств. Этот материал совмещает превосходную износостойкость с отличной ударной вязкостью даже при низких температурах. Он имеет хорошее сочетание жесткости и механической демпфирующей способности, а также хорошо сваривается. Обладает низким влагопоглощением, устойчив к воздействию многих химических веществ, хорошо поддается механической обработке.

UHMWPE является прекрасной альтернативой Фторопласту 4 при условии, что температура эксплуатации не превышает 60-70°C.

Типичные свойства UHMWPE:

Плотность	0.93 г/см^3
Влагопоглощение, % (ISO 62)	<0.01
Модуль упругости при растяжении (ISO 527)	680 МПа
Твердость по Шору (ISO 868), шкала D	63
Износостойкость (песчаная суспензия)	80
Температура плавления	135 °C
Коэффициент линейного теплового расширения (DIN 53752), $10^{-5}K^{-1}$	150-230
Рабочий диапазон температур (долговременно)	-250 - +80 °C
Рабочий диапазон температур (кратковременно)	130 °C
Температура деформации (ISO 306)	79 °C

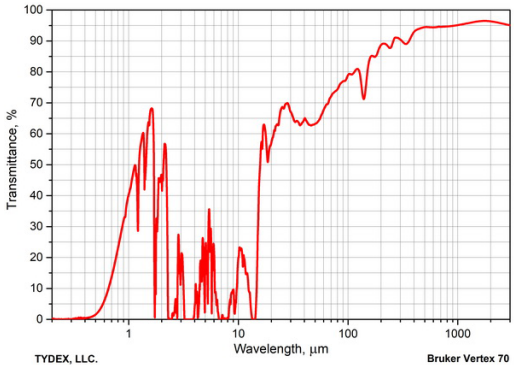

Рис. 17. Пропускание UHMWPE окна толщиной 2 мм.

2.4 Политетрафлюроэтилен (PTFE, тефлон, по-русски - фторопласт)

PTFE - это белый, твердый и тяжелый пластик с плотностью около 2.2 г/см^3. Его температура плавления составляет 327°C, при этом он сохраняет свои свойства полезными в широком диапазоне температур от -73°C до 204°C. Показатель преломления ~1.43 в широком диапазоне длин волн.

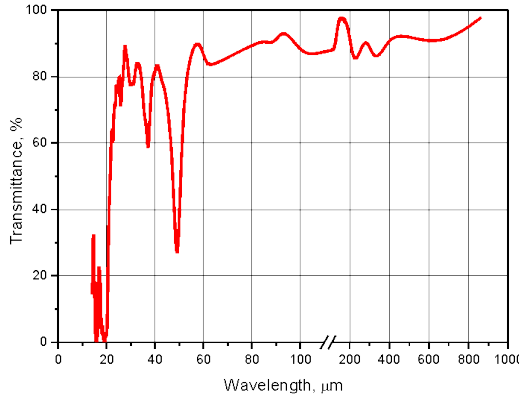

Рис. 18. Пропускание пленки PTFE толщиной ~0,1 мм. ТГц диапазон.

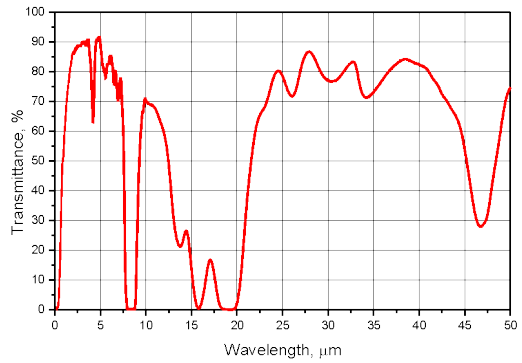

Рис. 19. Пропускание пленки PTFE толщиной ~0,1 мм. БИК&СИК диапазоны.

Благодаря хорошему пропусканию от 1 до 7 микрон пленки PTFE используются для производства ИК поляризаторов. Себестоимость таких поляризаторов ниже, чем кристаллических. Это является преимуществом при массовом производстве ИК сенсоров, использующих поляризованное излучение.

Типичные свойства PTFE:

Предел прочности на разрыв	3900 ф/кв.д ~26.7 МПа
Модуль растяжения	80000 ф/кв.д ~551.6 МПа
Относительное удлинение при разрыве, %	300
Прочность на изгиб	Не ломается
Модуль изгиба, ф/кв.д	72000
Предел прочности при сжатии, ф/кв.д	3500
Модуль сжатия, ф/кв.д	70000

2.5 Циклический Олефиновый Сополимер (COC)

Циклический Олефиновый Сополимер (COC) привлекателен из-за высокой рабочей температуры, отличного пропускания, низкого двулучепреломления и низкого влагопоглощения.

Ниже приведены характеристики материала, использующегося нами для изготовления ТГц асферических f-theta линз

Типичные свойства COC:

Плотность	1.01 г/см^3
Влагопоглощение, % (ISO 62)	<0.01
Паропроницаемость (23C 85% RH, DIN 53122)	0.025 г*мм/(м^2*24ч)
Предел прочности	63 МПа
Модуль растяжения	2600 МПа
Растяжение при пределе текучести	4.5 %

Домостроительная ул. 16
194292 С.-Петербург, Россия
www.tydex.ru

Тел. : 7-812-3318702
Факс: 7-812-3092958
E-mail: optics@tydex.ru

TYDEX®

Температура теплового отклонения HDT/B(0,45MPa)	75 °C
Точка стеклования	78 °C
Температура плавления	190-250 °C
Показатель преломления	1.53

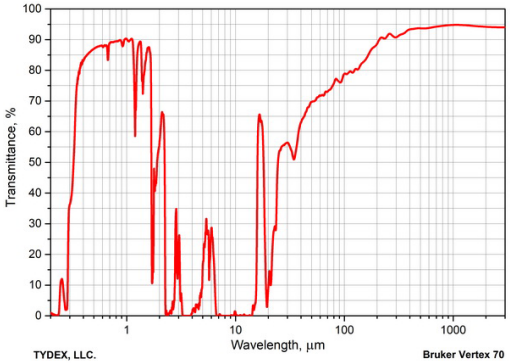

Рис. 20. Пропускание COC окна толщиной 2 мм.

Заключение

Как видно, выбранные нами органические материалы: TPX, ZEONEX, COC, PE и PTFE имеют постоянное пропускание около 80-90%, начиная с ~200 микрон и до 1000-2000 микрон. Безусловно, они также отлично пропускают и при больших длинах волн.

Сравнение спектров пропускания образов полимеров одинаковой толщины, используемых для изготовления окон, позволяет выбрать наиболее подходящий материал для той или иной задачи.

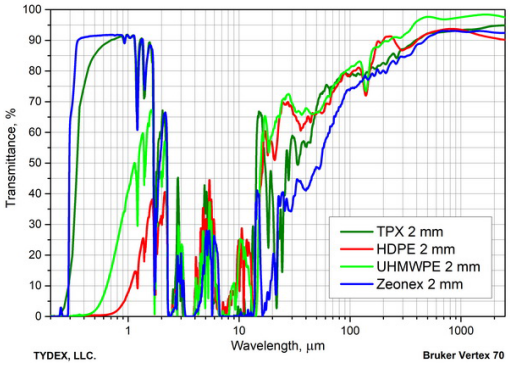

Рис. 21. Пропускание TPX, Zeonex, HDPE и UHMWPE окон толщиной 2 мм.

Кристаллические материалы, такие как кремний, кварц и сапфир имеют более низкое пропускание в ТГц диапазоне вследствие потерь на отражение. Для кремния - это 50-54%, начиная с 50 микрон, для кварца - это >70%, начиная с около 120 микрон, для сапфира - >50%, начиная с около 350 микрон для образцов 1-2-мм толщины.

Также обращаем Ваше внимание на то, что мы не поставляем полимерные и кристаллические материалы в заготовках или как сырье. Наши стандартные продукты - готовые изделия. Информацию о производимых нами приборах и компонентах для ТГц применений можно найти на нашем сайте в разделах: ТГц приборы, ТГц устройства, ТГц поляризаторы, ТГц оптика.

(*) данные представлены X.- C. Zhang и Jian Chen из Rensselaer Polytechnic Institute, USA.

(**) X.- C. Zhang, J. Xu, Introduction to THz Wave Photonics, Springer Science+Business Media, LLC 2010 (с. 73).

(***) данные представлены J. Steven Dodge и Graham Lea из Simon Fraser University, Canada.

Домостроительная ул. 16
194292 С.-Петербург, Россия
www.tydex.ru

Тел. : 7-812-3318702
Факс: 7-812-3092958
E-mail: optics@tydex.ru