

# ТГц материалы

Терагерцовое (ТГц) излучение располагается в спектральном диапазоне  $\sim 0.1-10$  ТГц ( $\sim 3$  мм - 30 микрон,  $3 \text{ см}^{-1}$  -  $300 \text{ см}^{-1}$ ) 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, характеристика 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.

Также очевидно, что кремний является одним из наиболее технологичных материалов, позволяющим создавать на его базе элементы быстроразвивающейся терагерцовой электроники.

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).

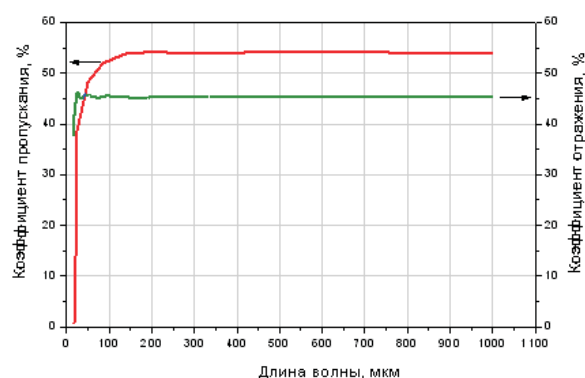


Рис. 1. Пропускание и отражение высокоомного кремния. ТГц диапазон.

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.

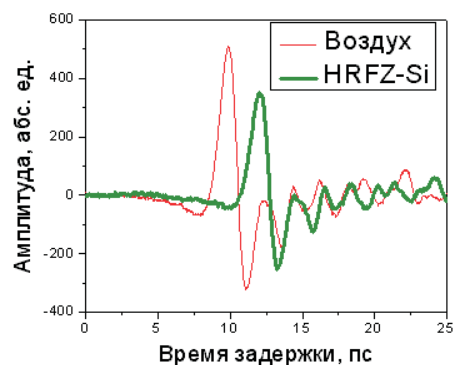


Рис. 2. ТГц сигналы, прошедшие через воздух и высокоомный кремний (\*).

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.



**TYDEX**<sup>®</sup>  
J.S.C.O.

Домостроительная ул. 16, 194292 С.-Петербург, РОССИЯ  
Тел: 7-812-3318702, -3346701; Факс: 7-812-3346702  
E-mail: tydex@tydex.ru, URL: <http://www.tydex.ru>

# ТГц материалы

Благодаря этому потери в кремнии в ТГц 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 ( $8.85*10^{-12}$  Ф/м),  $\epsilon_0$  - 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  $1.54*10^{-5}$ .

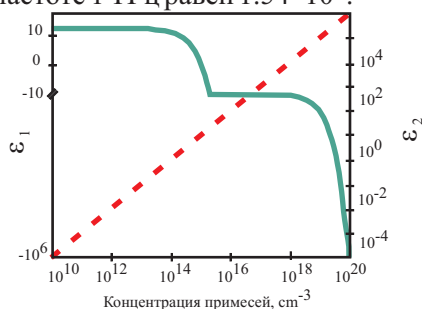


Рис. 3. Действительная (сплошная линия,  $\epsilon_1$ ) и мнимая (пунктирная линия,  $\epsilon_2$ ) части диэлектрической проницаемости кремния с различной концентрацией примесей при частоте 1 ТГц. (\*\*)

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;
- их можно охлаждать ниже  $\lambda$ -точки жидкого гелия.

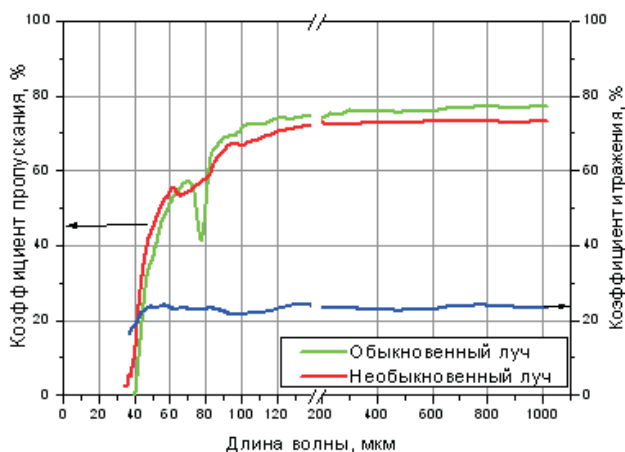


Рис. 4 Пропускание и отражение образца кристаллического кварца толщиной 1 мм.

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 такие линзы будут использованы для настройки оптических систем.

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

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

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

## 1.3 Сапфир

Сапфир подобно кристаллическому кварцу прозрачен в субмиллиметровой области так же, как и в видимой. Как видно из приведенных ниже спектров, пропускание сапфира не зависит от его кристаллической ориентации с точностью измерений. 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.

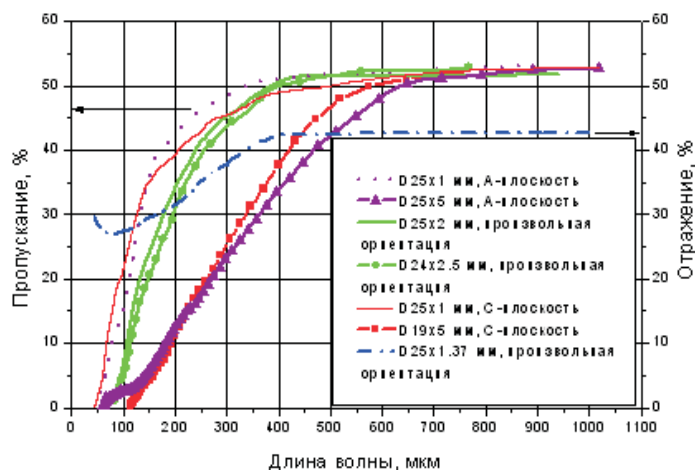


Рис. 5. Пропускание и отражение образцов сапфира различной толщины и кристаллографической ориентации.



**TYDEX**<sup>®</sup>  
J.S.Co.

Домостроительная ул. 16, 194292 С.-Петербург, РОССИЯ  
Тел: 7-812-3318702, -3346701; Факс: 7-812-3346702  
E-mail: tydex@tydex.ru, URL: http://www.tydex.ru

# ТГц материалы

Подобно высокоомному кремнию, сапфир, благодаря близкому показателю преломления, также может быть использован для изготовления фотопроводящих антенн для ТГц.

Больше об общих свойствах сапфира, а также спектры пропускания в УФ и видимом диапазонах можно найти в разделе Сапфировая оптика.

## 2. Полимеры

Среди большого разнообразия полимеров есть некоторые, имеющие отличную прозрачность для терагерцовых волн при низком отражении. Наилучшими материалами в этом смысле являются полиметилпентен (ТРХ), полиэтилен (РЕ) и политетрафторэтилен (PTFE, фторопласт или тефлон). При больших длинах волн пропускание этих полимеров бесструктурное и плоское. При коротких длинах волн, главным образом ниже 200 микрон, появляются характерные полосы поглощения, связанного с собственными колебаниями, а также увеличивается рассеяние на разного рода неоднородностях. Полимеры обычно становятся непрозрачными при более коротких длинах волн, хотя ТРХ является исключением.

### 2.1 Полиметилпентен (ТРХ)

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 оптических систем. Его показатель преломления ~1.46, и он практически не зависит от длины волны.

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

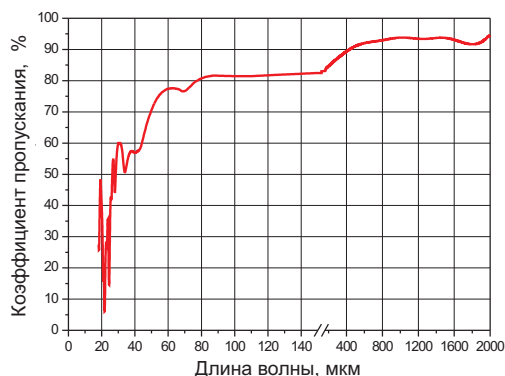


Рис. 6. Пропускание образца ТРХ толщиной 2 мм. ТГц диапазон.

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

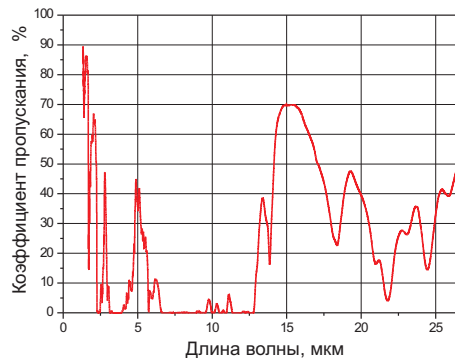


Рис. 7 Пропускание образца ТРХ толщиной 2 мм. БИК&СИК диапазоны.

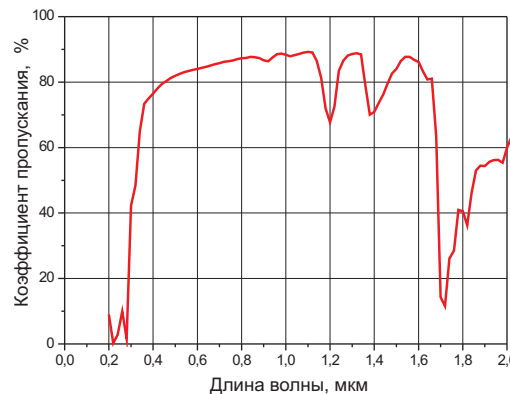


Рис. 8 Пропускание образца ТРХ толщиной 2 мм. УФ&ВИД&БИК диапазоны.

### Типичные свойства ТРХ

Плотность, г/см <sup>3</sup>	0.83
Предел прочности на разрыв	4100 ф (фунтов)/ кв.д. (дюйм) ~28.3 МПа
Модуль растяжения	280000 ф/кв.д. ~1930.5 МПа
Относительное удлинение при разрыве (%)	10
Прочность изгиба	6100 ф/кв.д 42.1 МПа
Модуль изгиба	210000 ф/кв.д 1447.8 МПа
Температура деформационной теплостойкости, °С	100
Температура плавления, (°F/°C)	464 / 240
Влагопоглощение (AST-D1238), %	<0.01
Влагопроницаемость (толщина 25мкм, 40°С, 90%RH), г/м <sup>2</sup> *24 ч	110
Кислородопроницаемость (толщина 1000мкм), см <sup>3</sup> /м <sup>2</sup> *24ч*МПа	120000



**TYDEX**<sup>®</sup>  
J.S.CO.

Домостроительная ул. 16, 194292 С.-Петербург, РОССИЯ  
Тел: 7-812-3318702, -3346701; Факс: 7-812-3346702  
E-mail: tydex@tydex.ru, URL: http://www.tydex.ru

# ТГц материалы

ТРХ - это 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 газовых молекулярных лазерах, оптически накачиваемых  $\text{CO}_2$  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 -  $3.0 \cdot 10^{-4} \text{ K}^{-1}$  (для диапазона температур 8-120 К).

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

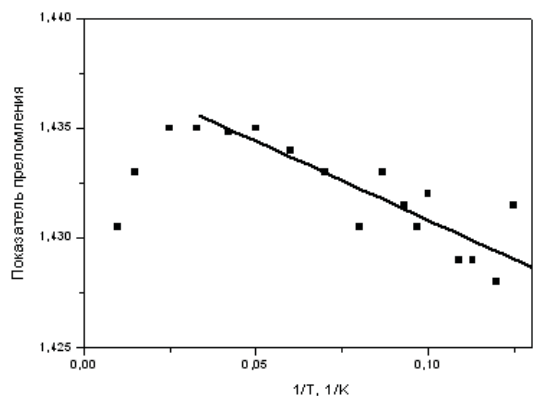


Рис. 9. Температурная зависимость показателя преломления (\*\*\*)

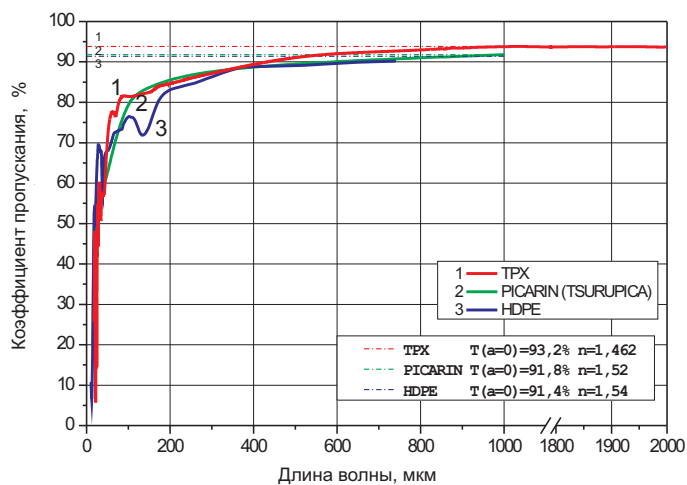


Рис. 10. Пропускание образцов ТРХ, пикарина и HDPE (полиэтилена высокой плотности) толщиной 2 мм

## 2.2. Полиэтилен (PE)

PE - это легкий и эластичный кристаллизованный материал. Полиэтилен может быть нагрет до  $110^\circ\text{C}$  и охлажден до  $45 \div 120^\circ\text{C}$  в зависимости от марки. Этот материал имеет хорошие диэлектрические характеристики, химическую и радиостойкость. Однако, он чувствителен к УФ облучению, к жирам и маслам. Полиэтилен биологически инертен, легко обрабатывается. Плотность при  $23^\circ\text{C}$  -  $0.91-0.925 \text{ г/см}^3$ . Предел пластической деформации ( $23^\circ\text{C}$ ) - 8-13 МПа. Модуль упругости ( $23^\circ\text{C}$ ) - 118 - 350 МПа. Показатель преломления  $\sim 1.54$  и слабо меняется в широком диапазоне длин волн.

Обычно для производства оптических компонентов используется полиэтилен высокой плотности (HDPE). Мы используем тонкие пленки HDPE в ТГц поляризаторах, а также HDPE в качестве окон при производстве детекторов Голея.

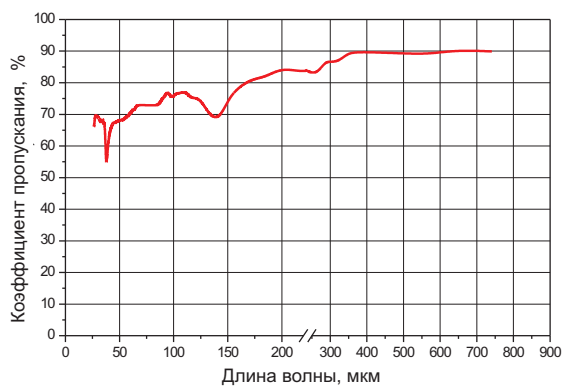


Рис. 11. Пропускание образца HDPE толщиной 2 мм. ТГц диапазон.

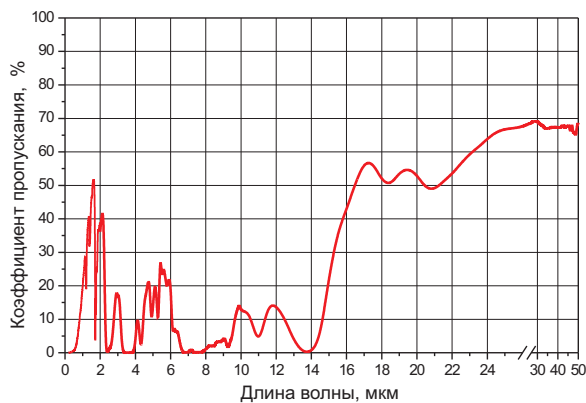


Рис. 12. Пропускание образца HDPE толщиной 2 мм. БИК&СИК диапазоны.

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 окна из этого материала в криостатах. Температурный коэффициент показателя преломления -  $6.2 \cdot 10^{-4} \text{ K}^{-1}$  (для диапазона температур 8-120 К).



**TYDEX**<sup>®</sup>  
J.S.CO.

Домостроительная ул. 16, 194292 С.-Петербург, РОССИЯ  
Тел: 7-812-3318702, -3346701; Факс: 7-812-3346702  
E-mail: tydex@tydex.ru, URL: http://www.tydex.ru

# ТГц материалы

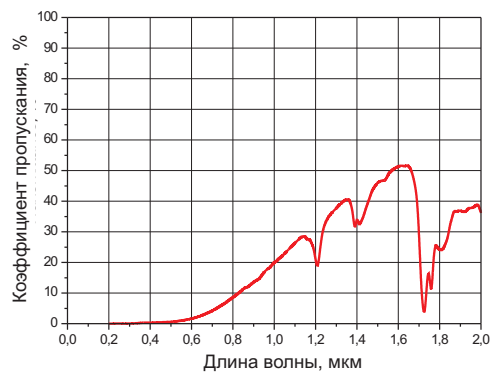


Рис. 13 Пропускание образца HDPE толщиной 2 мм. ВИД&БИК диапазоны.

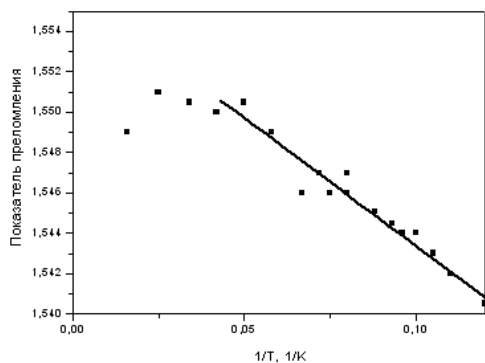


Рис. 14. Температурная зависимость показателя преломления (\*\*\*)

## 2.3 Политетрафторэтилен (PTFE, тефлон, по-русски - фторопласт)

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

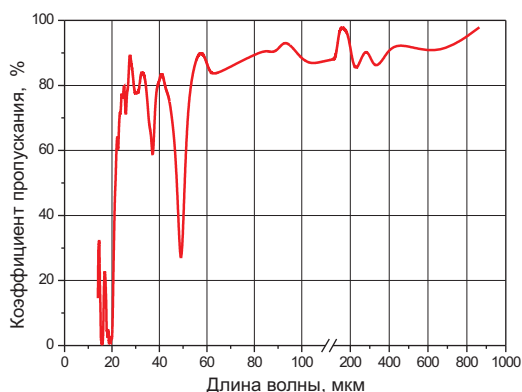


Рис. 15. Пропускание пленки PTFE толщиной ~0.1 мм. ТГц диапазон.

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.

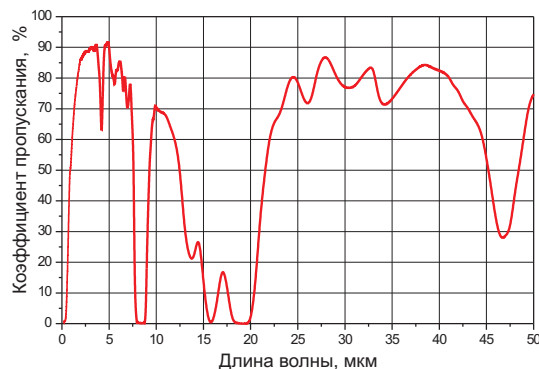


Рис. 16. Пропускание пленки PTFE толщиной ~0.1 мм. БИК&СИК диапазоны.

### 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

### Закключение

Как вы видите, органические материалы: TPX, PE и PTFE - имеют однородное стабильное пропускание около 80-90%, начиная с ~200 микрон и до 1000-2000 микрон. Безусловно, они также отлично пропускают и при больших длинах волн.

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 - >70%, начиная с около 120 микрон, для сапфира - >50%, начиная с около 350 микрон для образцов 1-2-мм толщины.

Обращаем 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 компонентах для ТГц применений можно найти в соответствующих разделах.

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



**TYDEX**<sup>®</sup>  
J.S.Co.

Домостроительная ул. 16, 194292 С.-Петербург, РОССИЯ  
Тел: 7-812-3318702, -3346701; Факс: 7-812-3346702  
E-mail: tydex@tydex.ru, URL: http://www.tydex.ru