



# Кремний

Обычно кремний считается материалом для систем, работающих в средней ИК-области спектра от 3 до 5 микрон. Но фактически этот материал может использоваться в гораздо более широком диапазоне длин волн от 1.2 микрон до 1000 микрон и даже больше.

Мы используем три вида кремния:

- кремний оптический, выращенный методом Чохральского (OCz-Si),
- кремний оптический, выращенный методом зонной плавки (FZ-Si),
- кремний высокоомный оптический, выращенный методом зонной плавки (HRFZ-Si).

Выбор материала из этих трёх типов зависит от рабочего диапазона длин волн, толщины элемента и специфики применения. Мы используем кристаллы соответствующего типа (в зависимости от технологии изготовления, типа проводимости и сопротивления), чтобы достичь наилучшего пропускания в требуемой области спектра. Ниже продемонстрированы и описаны основные принципы правильного выбора материала. Также надо отметить, что пропускание не зависит от ориентации кристалла, так как кремний, имея кубическую симметрию, является изотропным кристаллом.

На рис. 1 показаны спектры пропускания кремния в ближнем и среднем ИК-диапазонах. Как видно, в диапазоне от 3 до 5 микрон нет практически никакой разницы в пропускании материалов всех используемых градаций и сопротивлений. Также все типы материалов имеют фоновые пики абсорбции, обусловленные решеточным поглощением в диапазоне от 6.5 до 25 микрон. Кремний, выращенный методом Чохральского, имеет пики на длинах волн 5.8, 9.1 и 19.4 микрон, индуцированные кислородным поглощением.

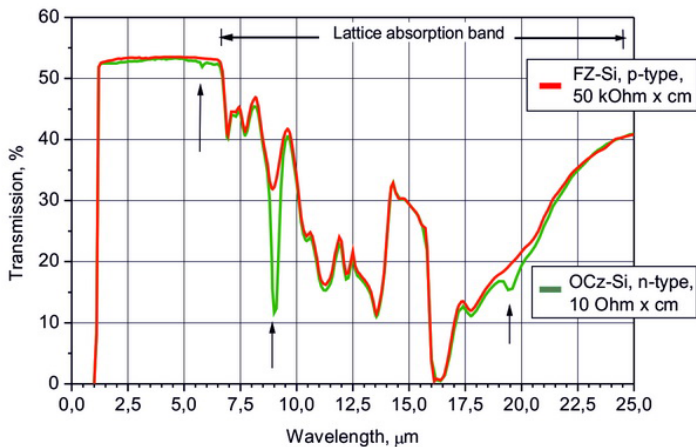


Рис. 1 Пропускание кремния в диапазоне 1-25 микрон. Стрелками указаны пики кислородного поглощения. Толщина образца 5 мм.

За счет гораздо меньшей концентрации кислорода ( $10^{16} \text{ см}^{-3}$  вместо порядка  $10^{18} \text{ см}^{-3}$  в кремнии, выращенном методом Чохральского) кремний, выращенный методом зонной плавки, не имеет кислородных пиков и может использоваться для более критичных применений.

Решёточное поглощение также как и кислородное поглощение, зависит от оптического пути луча внутри элемента (грубо от толщины элемента). Оно не зависит от сопротивления. Таким образом, толщина элемента является достаточно критичным параметром в диапазоне 6-25 микрон.

На рис. 2 приведены спектры пропускания образцов различной

толщины. Видно, что в диапазоне от 3 до 5 микрон, обычно используемом в пирометрии и термографии, и даже до 6.5 микрон зависимость пропускания от толщины незначительна. Для больших длин волн поглощение становится существенным, и пропускание сильно зависит от толщины. Для образца кремния, выращенного методом Чохральского, толщиной 5 мм среднее пропускание в диапазоне 8-10 микрон меньше 32% (для кремния, выращенного методом зонной плавки, около 38%) и только 18% в диапазоне 10-14 микрон (одинаково для кремния, выращенного методом зонной плавки и методом Чохральского).

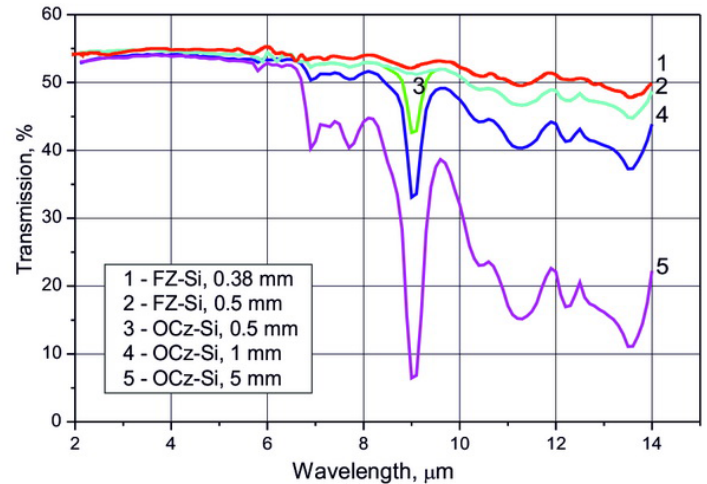


Рис. 2 Пропускание кремния, выращенного методом зонной плавки и методом Чохральского, в зависимости от толщины.

Однако, кремниевые окна толщиной менее, либо около 1 мм могут быть успешно использованы во втором «атмосферном окне» от 7 до 14 микрон. В этом диапазоне среднее пропускание окна из кремния, выращенного методом Чохральского, с толщиной 0.5 мм превышает 51% и для кремния, выращенного методом зонной плавки, оно немного выше (около 51.9%) из-за отсутствия кислородной линии поглощения.

Пропускание в дальнем ИК диапазоне показано на рис. 3. Мы обращаем внимание на то, что, начиная с 21 микрона, нет разницы в пропускании между кремнием, выращенным методом Чохральского и методом зонной плавки с одинаковым сопротивлением и типом проводимости. Для таких приложений (50 микрон и более) мы предлагаем высокоомный кремний, выращенный методом зонной плавки, сохраняющий пропускание 50-54% до 1000 микрон (и более по специальному запросу). Кремний с сопротивлением до 30 микрон/см может быть использован.

Максимальные размеры кристаллов, используемых для изготовления оптики:

- Si, выращенный методом Чохральского — 300 мм;
- Si, выращенный методом зонной плавки — 150 мм;
- высокоомный Si, выращенный методом зонной плавки — 150 мм.



# Кремний

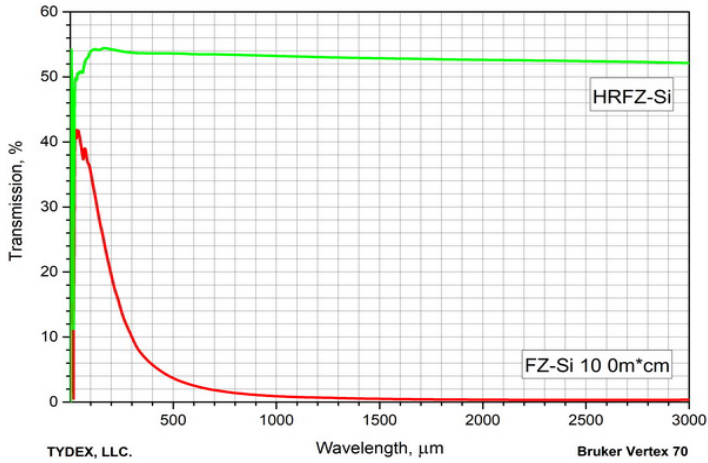


Рис. 3 Пропускание кремния, 16-3000 микрон. Толщина образцов 5 мм.

## Коэффициент преломления кремния в

λ, микроны	n	λ, микроны	n
1.40	3.4900	5.83	3.4241
1.50	3.4841	5.92	3.4239
1.66	3.4700	6.00	3.4238
1.82	3.4600	6.50	3.4232
2.00	3.4561	6.92	3.4228
2.50	3.4431	7.00	3.4227
3.00	3.4360	7.14	3.4226
3.30	3.4326	7.30	3.4225
3.50	3.4317	7.50	3.4224
4.00	3.4289	7.72	3.4222
4.50	3.4270	8.00	3.4220
5.00	3.4256	8.16	3.4220
5.19	3.4200	8.50	3.4218
5.50	3.4246	9.00	3.4216
5.70	3.4243	9.09	3.4215

В соответствии с формулой  $n = \sqrt{\epsilon_0}$ , где  $\epsilon_0 = 11,67$  - статическая диэлектрическая проницаемость, коэффициент преломления кремния стремится к значению 3.416 при стремлении длины волны к бесконечности (до 1000 микрон и более). Обращаем ваше внимание на то, что мы не поставляем кремний в необработанном виде, а только готовые, полированные компоненты.

Физические свойства кремния	
Плотность, г/см <sup>3</sup>	2.329
Точка плавления, °C	1412
Молекулярный вес	28.09
Поверхностное натяжение, (в жидком состоянии в точке плавления), мН/м	736
Коэффициент линейного термического расширения при 25°C	$2.55 \times 10^{-6}$
Теплопроводность при 27°C, Вт/(м x °C)	159
Удельная теплоемкость (тв.), Дж/(кг x °C)	712
Тепловой коэффициент показателя преломления при @ 25°C	$1.50 \times 10^{-4}$
Модуль разрыва, МПа	125
Твердость по Моосу	7
Модуль Юнга (E), Па $1.89 \times 10^{10}$	
Модуль сдвига (G), Па $7.99 \times 10^{10}$	
Коэффициент поперечной деформации (Пуассона)	0.266
Растворимость в воде	нераств.

Электрические свойства кремния		
Собственное сопротивление, кОм x см	240	
Дрейфовая подвижность собственных электронов, см <sup>2</sup> /(В x сек.)	1500	
Количество электронов, см <sup>-3</sup>	$1.22 \times 10^{10}$	
1 Ом x см (n-тип) равен, $10^{15}/\text{см}^3$	2.93	
1 Ом x см (p-тип) равен, $10^{15}/\text{см}^3$	7.33	
Дрейфовая подвижность собственных дырок, см <sup>2</sup> /(В x сек.)	600	
Запрещенная зона, минимум, эВ	300 K	1.14
	0 K	1.17