

3. Kang, M.-G. Semitransparent Cu electrode on a flexible substrate and its application in organic light emitting diodes/ M.-G. Kang, L.G.Guo // J. of Vac. Sci. and Technol. B. – 2007. – V. 25. – № 6. – P. 2637–2641.

**Д.В. Слепенков** (УО «ГГУ имени Ф. Скорины», Гомель)  
Науч. рук. **С.А. Хахомов**, канд. физ.-мат. наук, доцент

## **КРЕМНИЙ И ЕГО СВОЙСТВА В МИКРОВОЛНОВОМ ДИАПАЗОНЕ ДЛИН ВОЛН**

Обычно, кремний считается материалом используемым для систем, работающих в средней ИК-области спектра от 3 до 5 мкм, но фактически этот материал может использоваться в гораздо более широком диапазоне длин волн от 1,2 мкм до 1000 мкм и даже больше.

Задачей данного исследования является анализ свойств различных типов кремния, пригодных для использования в качестве подложки для размещения двумерного массива элементов, с целью получения поглощающего метаматериала в микроволновом диапазоне длин волн (в частности нас интересует область вблизи 300 мкм (1ТГц)). Такая подложка должна обладать высоким коэффициентом пропускания в выбранном диапазоне.

Рассмотрим 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 образца. Рассмотрим кристаллы соответствующего типа (в зависимости от технологии изготовления, типа проводимости и сопротивления), чтобы достичь наилучшего пропускания в требуемой области спектра.

Надо отметить, что пропускание кремния не зависит от ориентации кристалла, так как кремний, имея кубическую симметрию, является изотропным кристаллом. На рисунке 1 показаны спектры пропускания кремния в ближнем и среднем ИК-диапазонах. Как видно, в диапазоне от 3 до 5 мкм нет практически никакой разницы в пропускании материалов всех используемых градаций и сопротивлений. Также все типы материалов имеют фонные пики абсорбции, обусловленные решеточным поглощением в диапазоне от 6,5 до 25 мкм. Кремний, выращенный методом Чохральского, имеет пики на длинах волн 5,8, а также 9,1 и 19,4 мкм, индуцированные кислородным поглощением.

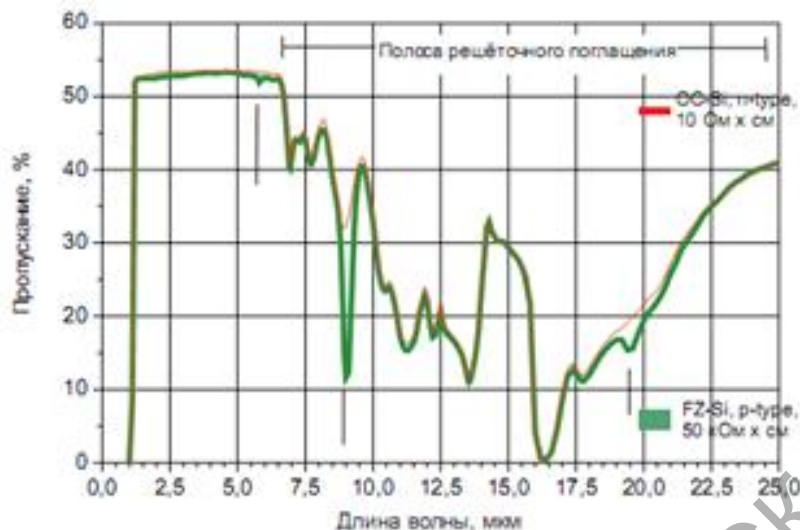


Рисунок 1 – Пропускание кремния в диапазоне 1–25 мкм (толщина образца 5 мм)

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, так же как и кислородное поглощение, зависит от оптического пути луча внутри элемента (от толщины элемента), но не зависит от сопротивления. Таким образом, толщина элемента является достаточно критичным параметром в диапазоне 6–25 мкм.

В диапазоне от 3 до 5 мкм, обычно используемом в пирометрии и термографии, и даже до 6,5 мкм 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 мкм меньше 32% (для кремния, выращенного методом зонной плавки, около 38%) и только 18% в диапазоне 10–14 мкм (одинаково для кремния, выращенного методом зонной плавки и методом Чохральского).

Однако, кремниевые окна толщиной менее, либо около 1 мм могут быть успешно использованы во втором «атмосферном окне» от 7 до 14 мкм. 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 рисунке 2. Нужно обратить внимание на то, что, начиная с 21 мкм, нет разницы в пропускании

между кремнием, выращенным методом Чохральского и методом зонной плавки с одинаковым сопротивлением и типом проводимости. Для таких приложений (50 мкм и более) выгоднее использовать высокоомный кремний, выращенный методом зонной плавки, сохраняющий пропускание 50–54% до 1000 мкм. Максимальные размеры кристаллов, используемых для изготовления оптических приборов:

- кремний выращенный методом Чохральского – 300 мм;
- кремний выращенный методом зонной плавки – 150 мм;
- высокоомный кремний выращенный методом зонной плавки – 150 мм.

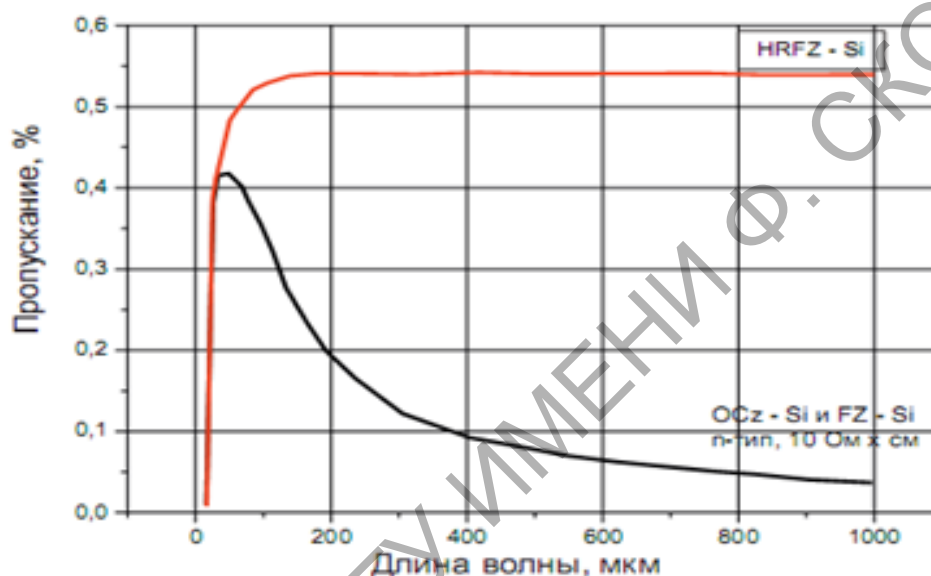


Рисунок 2 – Пропускание кремния, 16–1000 мкм (толщина образцов 5 мм)

Анализ трех типов кремния позволяет сделать вывод, что наибольшим коэффициентом пропускания в интересующем нас диапазоне длин волн является кремний высокоомный оптический, выращенный методом зонной плавки (HRFZ-Si).

### Литература

1. Интернет портал компании ООО «Тидекс». – Санкт-Петербург 2017. – Режим доступа: <http://www.tydexoptics.com> /дата доступа: 18.04.2017.

2. Интернет портал компании ЗАО «Ай Эс Пи Оптика Санкт-Петербург» – Санкт-Петербург 2017. – Режим доступа: <http://www.ispoptics.ru> /. дата доступа : 18.04.2017.