

# МОДЕЛИРОВАНИЕ ОПТИЧЕСКОГО БРЭГГОВСКОГО ФИЛЬТРА НА ЧИПЕ ДЛЯ ВИДИМОГО ДИАПАЗОНА ДЛИН ВОЛН

А.Ю. Кузин  
НИУ ВШЭ,

департамент электронной инженерии  
МИЭМ НИУ ВШЭ

## Аннотация

Данная работа посвящена моделированию оптического брэгговского фильтра для видимого диапазона на чипе. С применением моделирования получены основные характеристики брэгговского фильтра для видимого диапазона: центральная длина волны, коэффициент пропускания, полуширина вырезаемой мощности от геометрических размеров и количество периодов. Сделаны соответствующие выводы зависимости физических параметров брэгговского фильтра от геометрических, которые качественно совпадают с экспериментально полученными данными [1].

## Введение

Использование оптических интегральных устройств (ОИУ) [2] уже давно зарекомендовало себя для передачи и обработки сигналов. Невосприимчивость к электромагнитным помехам, малые потери при передаче, малые размеры и вес дают большое преимущество перед электронными компонентами. Используя принципы работы ОИУ и современные технологии возникло новое направление нанофотоники, которое нуждается в моделировании и создании интегральных компонентов. В качестве объекта для моделирования представлен брэгговский фильтр, работающий в видимом диапазоне света (680 нм). В общем случае брэгговский фильтр представляет из себя структуру из слоёв с чередующимся показателем преломления. Однако, особенностью брэгговского фильтра на чипе является замена слоёв с разным показателем преломления на волновод, выполненный из одного материала, но разной ширины. Данный фильтр может использоваться для фильтрации света, излучаемого различными нанообъектами, например, NV-центров на длине волны 680 нм [3]. В качестве волновода брэгговского фильтра в модели нами выбран  $Si_3N_4$ , который обладает низкими оптическими потерями в видимом и инфракрасном диапазоне длин волн, а также совместим с КМОП-технологией.

## Принцип действия

Дизайн брэгговского фильтра вместе с исходными геометрическими размерами представлен на рис. 1. Оптическое излучение  $P_{in}$  заводится в волновод и далее движется до брэгговского фильтра, который представляет из себя волновод шириной  $W_{in}$  с зубчиками определённой высоты  $h$ . Период между зубчиками обозначается  $\Delta$ , а ширина зубчика  $a$ . Свет, проходя сквозь зубчики брэгговской решётки, будет отражаться на определённых длинах волн в одинаковой фазе и складываться, увеличивая вырезаемую мощность пика выходного оптического излучения  $P_{out}$ . В итоге на выходе брэгговского фильтра будет провал в мощности оптического излучения на определённой длине волны, ( $S_{21}$ ), а на входе на этой же длине волны будет отражённая от зубчиков оптическая мощность ( $S_{11}$ ). Ещё одним параметром брэгговской решётки является фактор заполнения  $F$ , который рассчитывается по формуле:

$$F = \frac{a}{\Delta} \cdot 100[\%], \quad (1)$$

где  $a$  – ширина зубчика,  $\Delta$  – период между зубчиками.

Центральную длину волны можно определить из условия Брэгга [4]:

$$\lambda_c = 2n_{eff}\Delta, \quad (2)$$

где  $\lambda_c$  – длина волны брэгговского резонанса,  $n_{eff}$  – эффективный показатель преломления для центральной длины волны,  $\Delta$  – период брэгговской решётки.

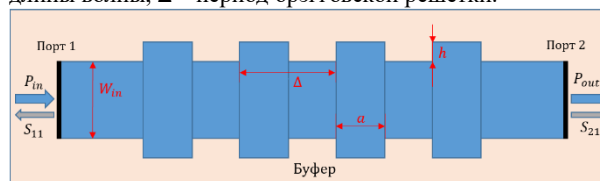


Рис. 1. Дизайн брэгговского фильтра и его основные геометрические параметры:  $W_{in}$  – ширина волновода,  $h$  – высота зубчика,  $\Delta$  – период между зубчиками,  $a$  – расстояние между зубчиками.  $P_{in}$  и  $P_{out}$  – входная и выходная мощности оптического излучения, а  $S_{11}$  и  $S_{21}$  – пропускание и отражение. Буфер – пространство вокруг волновода

## Расчёт эффективного показателя преломления

На первом этапе нами выполнена модель поперечного сечения полоскового (полностью протравленного) одномодового волновода с помощью программного пакета COMSOL Multiphysics (Рис. 2).

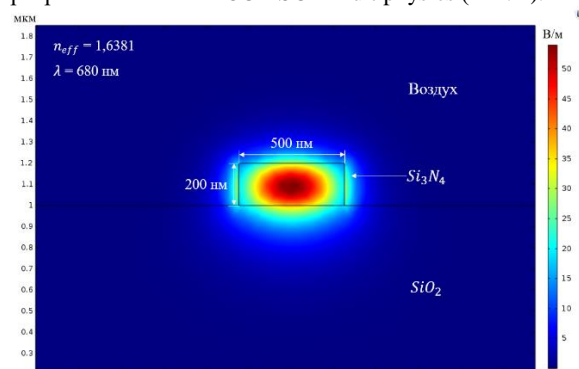


Рис. 2. Распределение электрического поля при длине волны 680 нм в поперечном сечении полностью протравленного волновода. Представлена TE – мода с эффективным показателем преломления  $n_{eff} = 1,6381$ . Цветом показано нормированное электрическое поле в В/м. Ось  $x$  и  $y$  – геометрические параметры волновода в микрометрах

Результаты численного расчёта зависимости эффективного показателя преломления от ширины волновода и длины волны представлены на рис. 3. На основании этих зависимостей нами получен период брэгговской решётки равный 206 нм для центральной длины волны резонанса – 680 нм с помощью формулы 2. Также рис. 3б демонстрирует нам возможность получения различных  $n_{eff}$  при изменении ширины волновода. Это объясняется тем, что при увеличении геометрии волновода оптическое излучение дольше распространяется в данном слое из – за увеличения проходимого пути.

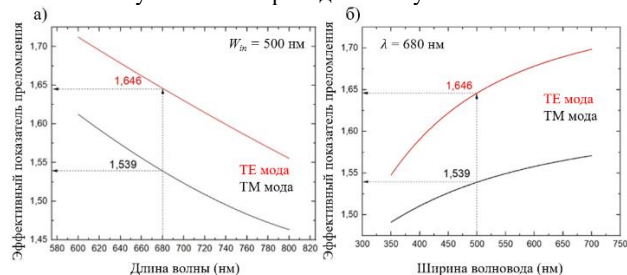


Рис. 3. а) График зависимости эффективного показателя преломления от длины волны при фиксированной ширине волновода 500 нм. б) График зависимости эффективного показателя преломления от ширины волновода при фиксированной длине волны 680 нм

### Выбор и построение модели

Однако, с помощью модели поперечного сечения брэгговского фильтра нельзя определить количество периодов зубчиков ( $N$ ) для эффективного вырезания мощности нужной глубины, полуширину вырезаемой мощности и фактор заполнения. Для этого требуется использование полной 3D модели, но для её расчёта и эффективной работы с ней требуются высокопроизводительные вычислительные кластеры, поэтому нами была создана 2D модель брэгговского волновода (вид сверху). Данная 2D модель представляет из себя волновод с периодически изменяющимся показателем преломления за счёт изменяющейся ширины волновода (зубчиков) рис. 4. Помимо волновода моделируется буферная зона, в которой экспоненциально затухает излучение, возникающее вокруг волновода (рис. 4.б).

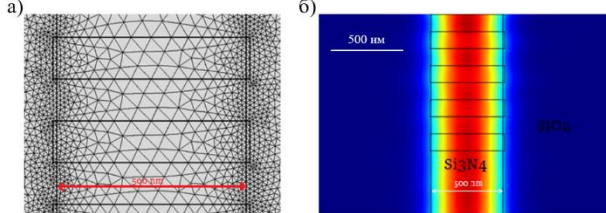


Рис. 4. а) Сетка конечных элементов 2D модели брэгговского фильтра, вид сверху, б) Распространение нормированного на входную мощность оптического излучения электрического поля в 2D модели вида сверху брэгговской решётки

### Результаты

На рис. 5 показан результат численного моделирования пропускания и отражения, выполненный с помощью 2D модели (вид сверху), а также обозначены основные параметры вырезаемого пика:  $\lambda_c$  – центральная длина волны, FWHM – полуширина на полувысоте вырезаемого пика. Кроме графика, представленного на рис. 5 для  $\Delta = 200$  нм выполнен расчёт для  $\Delta = 200, 210, 220, 230$  и  $245$  нм (рис. 6).

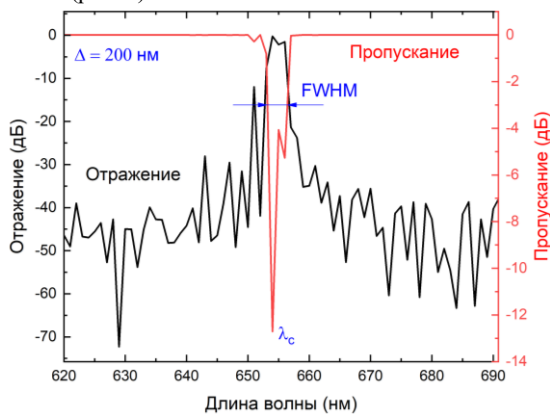


Рис. 5. Численно полученный график зависимостей пропускания и отражения оптического излучения от длины волны, где фактор заполнения равен 50%, а период – 200 (нм), центральная длина волны равна 654 нм

Полученные численным расчётом зависимости свидетельствуют о следующем:

1. При увеличении периода решётки центральная длина волны пика смещается в сторону увеличения длины волны, так как увеличивается длина волны кратная периоду брэгговской решётки. За счёт увеличения периода на 1 нм центральная длина волны сдвигается на  $2,149 \pm 0,25$  нм.
2. При увеличении высоты зубчика полуширина на полувысоте вырезаемого пика увеличивается, так как увеличивается эффективный показатель преломления (чем больше показатель преломления, тем большая центральная длина волны будет отражаться от брэгговской решётки).

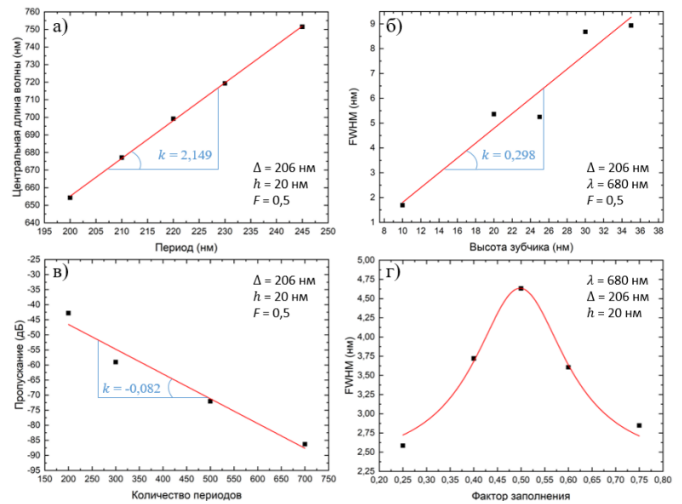


Рис. 6. а) Зависимость центральной длины волны от периода решётки при фиксированных значениях  $h, \Delta, F$ , б) Зависимость центральной длины волны от высоты зубчиков при фиксированных значениях  $\lambda, \Delta, F$ , в) Зависимость пропускания оптического излучения от количества периодов (в единицах) брэгговской решётки при фиксированных значениях  $h, \Delta, F$ , г) Зависимость полуширины вырезаемой мощности от фактора заполнения при фиксированных значениях  $h, \Delta, \lambda$

За счёт увеличения высоты зубчика на 1 нм полуширина на полувысоте вырезаемого пика увеличивается на 0,298 нм.

3. При увеличении количества периодов брэгговской решётки глубина вырезаемой мощности увеличивается, так как увеличивается количество зубчиков, которые вносят вклад в отражение центральной длины волны. За счёт увеличения количества периодов на 1 глубина вырезаемой мощности увеличится на 0,082 дБ.

4. При увеличении фактора заполнения полуширина вырезаемой мощности достигает максимального значения 4,63 нм при факторе заполнения равном 50%, так как это является оптимальным условием для отражения наибольшего интервала длин волн, после 50% наблюдается обратное уменьшение FWHM до минимального значения 2,69 нм при факторе заполнения 75%, также минимум равный 2.73 нм наблюдается на 25%.

### Заключение

Таким образом, в данной работе был смоделирован оптический брэгговский фильтр для видимого диапазона света (680 нм):  $h = 20$  нм,  $\Delta = 206$  нм,  $F = 50\%$  и  $N = 200$ . А также получены и проанализированы графики основных зависимостей физических параметров брэгговского фильтра от геометрических. Зависимости на рис. 6 а,б,в имеют линейный вид, поэтому в случае необходимости построения брэгговского фильтра с центральной длиной волны не входящей в заданные диапазоны зависимостей воспользуемся коэффициентом наклона  $k$ .

### Список литературы:

1. E Zubkova. Integrated Bragg waveguides as an efficient optical notch filter on silicon nitride platform / E Zubkova, P An, V Kovalyuk, A Korneev, S Ferrari, W Pernice, G Goltsman // Journal of Physics: Conference Series. – 2017 – Vol 917.
2. Robert G. Hunsperger. Integrated Optics: Theory and Technology / Robert G. Hunsperger // Introduction – 1984 – №1 – С. 9-18.
3. S Komrakova. On-chip controlled placement of nanodiamonds with a nitrogen-vacancy color centers (NV) / S Komrakova [et al.] // Journal of Physics: Conference Series. – 2018.
4. Andreas Othonos. Fiber Bragg gratings / A. Othonos. // Rev.Sci.Instrum. – 1997 – Vol 68 – №12 – P. 4309-4341.