

НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ
ВЫСШАЯ ШКОЛА ЭКОНОМИКИ

Факультет физики

Отчёт

«Фотонные кристаллы»

Блуменау М. И.



НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ

Москва
2021

Содержание

Введение	2
Теоретическая справка	2
Оборудование и методы	3
Первый эксперимент	3
Второй эксперимент	5
Вывод и дополнение	6
Список литературы	7

Введение

Целью данной работы являлось исследование необычных свойств фотонных кристаллов, а именно с периодическим изменением показателя преломления на масштабах сравнимых с длиной волны. В оптическом спектре фотонных кристаллов существуют узкие области длин волн, для которых распространение света подавляется. Такие необычные оптические свойства используются для создания разнообразных оптических элементов на основе фотонных кристаллов (оптических фильтров, отражателей). В данной работе свойства фотонных кристаллов изучались на примере пористых (содержащих воздушные каналы) пленок анодного оксида алюминия. Структура образцов, полученных с помощью электрохимического окисления (анодирования) алюминия, может быть представлена как система несвязанных цилиндрических каналов, расположенных перпендикулярно поверхности образца. На рисунке 1 изображена примерная структура вышеупомянутых цилиндрических каналов.

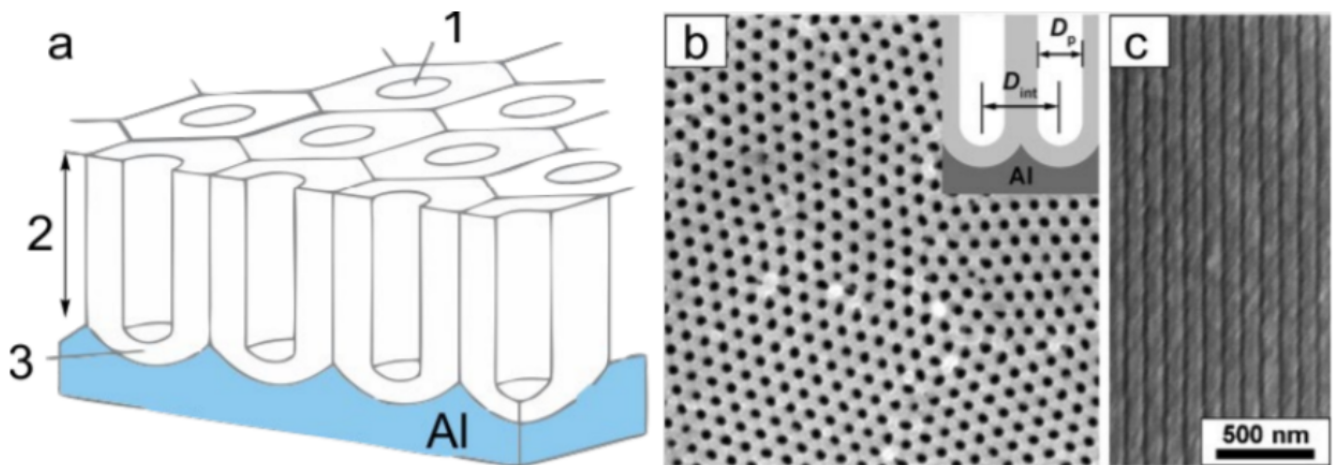


Рис. 1. (а) Схематическая структура пористой пленки оксида алюминия: 1 - пора, 2 - пористый слой, 3 - барьерный слой. Изображение пленки, полученное с помощью электронного микроскопа: (b) вид сверху, (c) поперечное.

Теоретическая справка

Рассмотрим параллельный монохроматический пучок с постоянной интенсивностью и длиной волны λ , падающий на фотонный кристалл. Пучки, отраженные от разных слоёв, интерферируют между собой. В результате интерференционная картина в отражённом свете имеет максимумы при определённых углах падения θ (минимумы пропускания наблюдаются при тех же углах), которые, согласно закону Брэгга-Снелла, определяются условием:

$$2D\sqrt{n^2 - \sin^2 \theta} = m\lambda, \quad (1)$$

где D период структуры фотонного кристалла, n - средний показатель преломления фотонного кристалла, $m = 1, 2, \dots$ - порядок интерференции, λ - длина волны света.

Заранее линеаризуем данную формулу (возведя обе части в квадрат и перенеся необходимые слагаемые):

$$\sin^2 \varphi = \frac{4D^2 n^2}{h^2} - \frac{4D^2}{h^2} \sin^2 \theta, \quad (2)$$

где видно, что зависимость линейна относительно квадратов синусов. Также заранее запишем формулу, связывающую угол дифракции при прохождении дифракционной решётки φ и длину волны λ :

$$h \sin \varphi = m\lambda \quad (3)$$

Оборудование и методы

Список использованного оборудования: линза, фотонный кристалл, дифракционная решётка, красный лазер с длиной волны 660нм, фотодиод, мультиметр, батарейка типа "Крона" напряжением 9В. На рисунке 2 ниже изображена установка первой части работы.

Для обработки результатов использовался язык программирования Python и совокупность пакетов Anaconda. Ссылка на исходный код:

<https://github.com/burunduk387/HSE-FF/tree/main/LabOptics/Фотонные%20кристаллы>

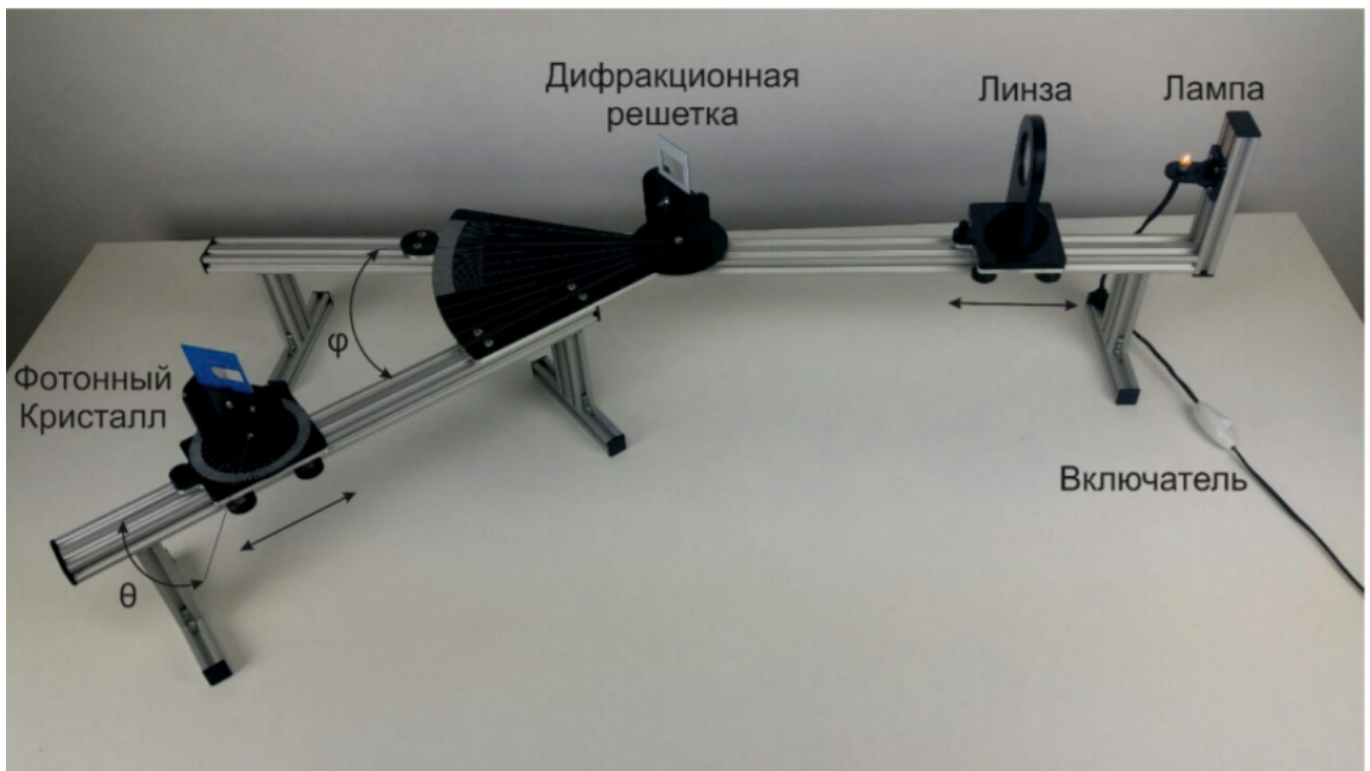


Рис. 2. Используемое оборудование в первой части эксперимента.

Первый эксперимент

На рисунке 3 изображена схема установки. Процесс выполнения работы таков: включаем лампочку и видим узкую полоску спектра на дифракционной решётке. Изменяя углы, подбираем их так, чтобы стала видна стоп-зона. Её достаточно просто увидеть. Тогда начнём изменять углы, следя за ней и стараясь оставить её в центре. Записывая θ и φ можно найти зависимость между ними. Но для начала найдём длину волны, соответствующую стоп-зоне при

$\theta = 0^\circ$. Сделав так, что стоп-зона находится в середине, получим $\varphi = 40.8^\circ$. В данном эксперименте в формуле 3 $m = 1, h = 1000$ нм. Из этого получаем длину волны, на которой находится стоп-зона:

$$h \sin 40.8^\circ = \lambda_0 \rightarrow \lambda_0 \approx 653 \text{ нм} \quad (4)$$

То есть, она находится в красной зоне спектра. Именно это и наблюдается на дифракционной решётке.

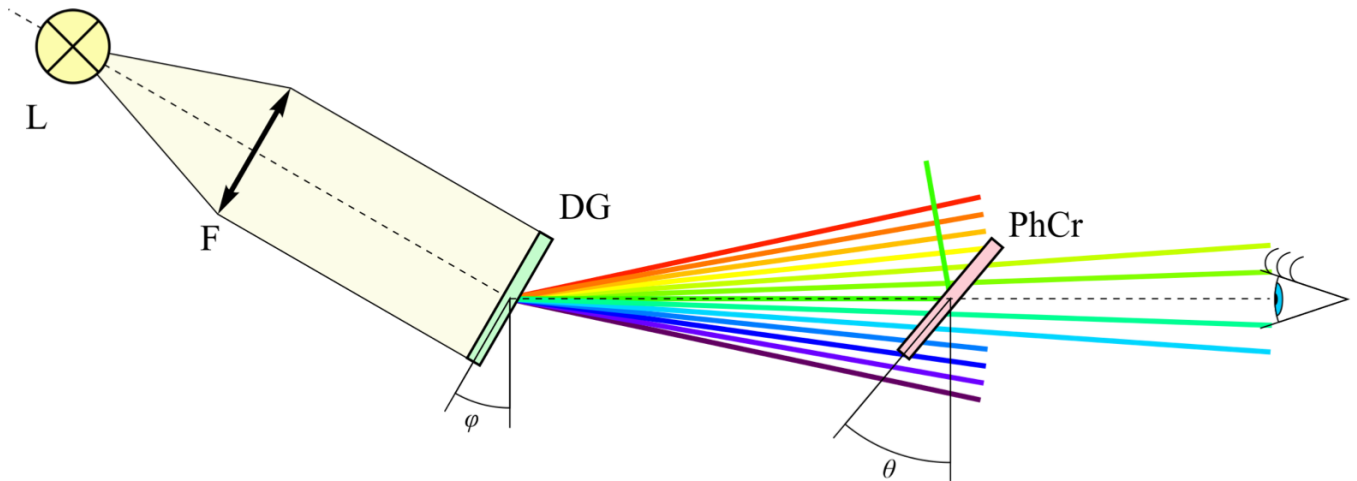


Рис. 3. Схема экспериментальной установки для проведения спектральных исследований: (F) линза, (L) лампочка, расположенная в фокусе линзы, (DG) дифракционная решетка, (PhCr) фотонный кристалл.

Перейдём к рассмотрению зависимости между углами. Для начала посмотрим на график $\theta(\varphi)$:

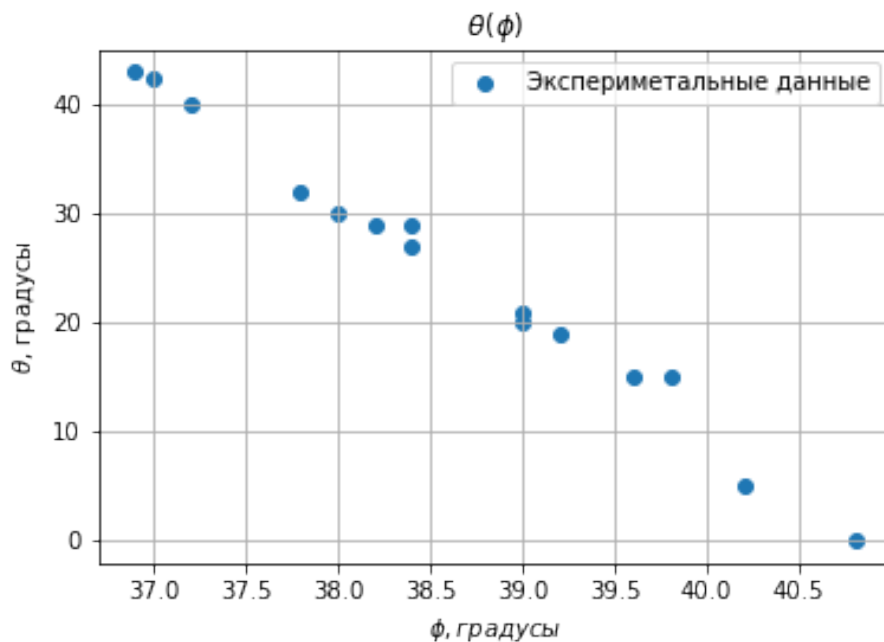


Рис. 4. График с полученными данными.

Далее, используя формулу 2 получим линеаризованную зависимость, из которой легко найти параметры D и n кристалла.

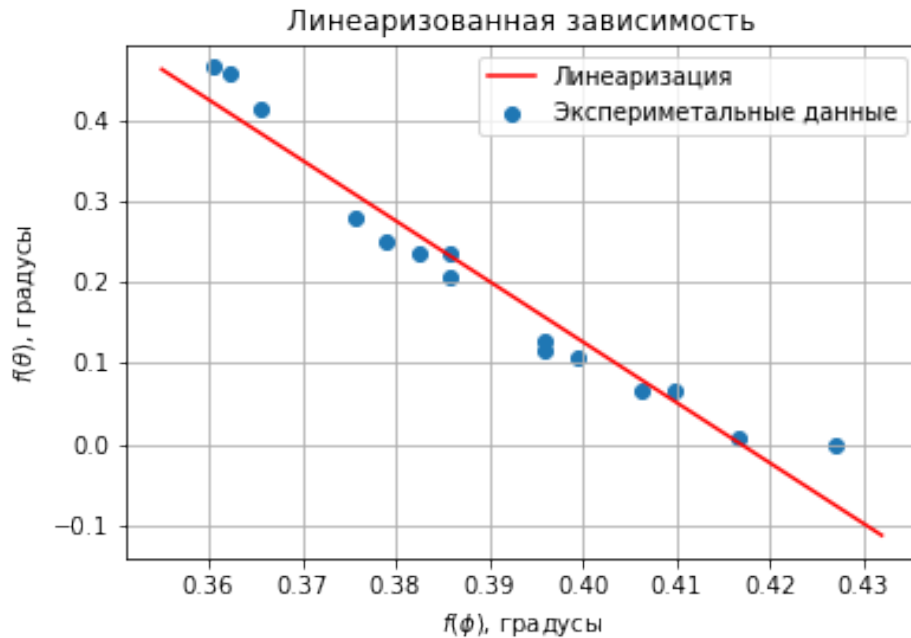


Рис. 5. График с полученными данными.

Используя полученный полином первой степени и его пересечение с осями координат, очевидным образом получается:

$$D \approx 220.5 \text{ нм}$$

$$n \approx 1.55$$

Второй эксперимент

Производились замеры тока, протекающего через фотодиод в зависимости от угла, под которым находился кристалл. Ниже изображена схема установки:

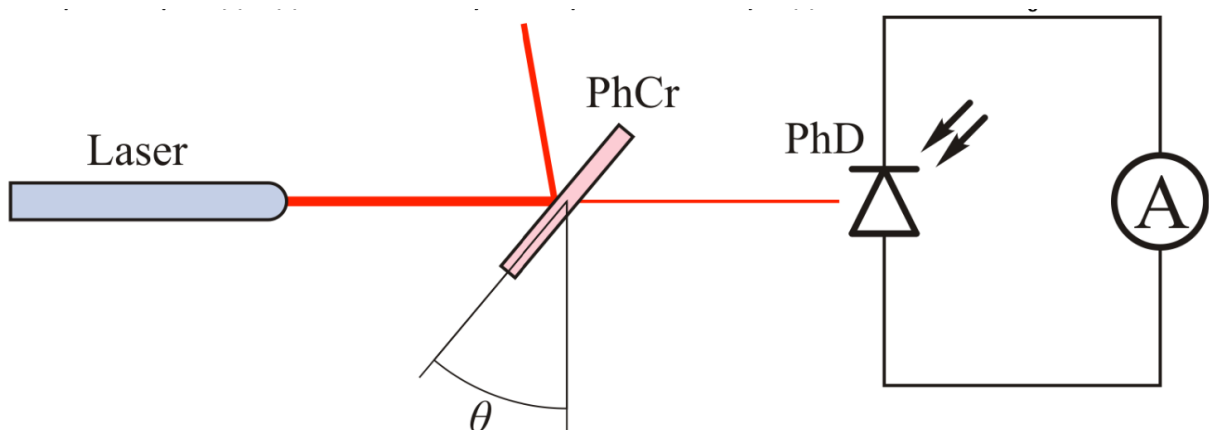


Рис. 6. Схема второй установки.

Результаты измерений:

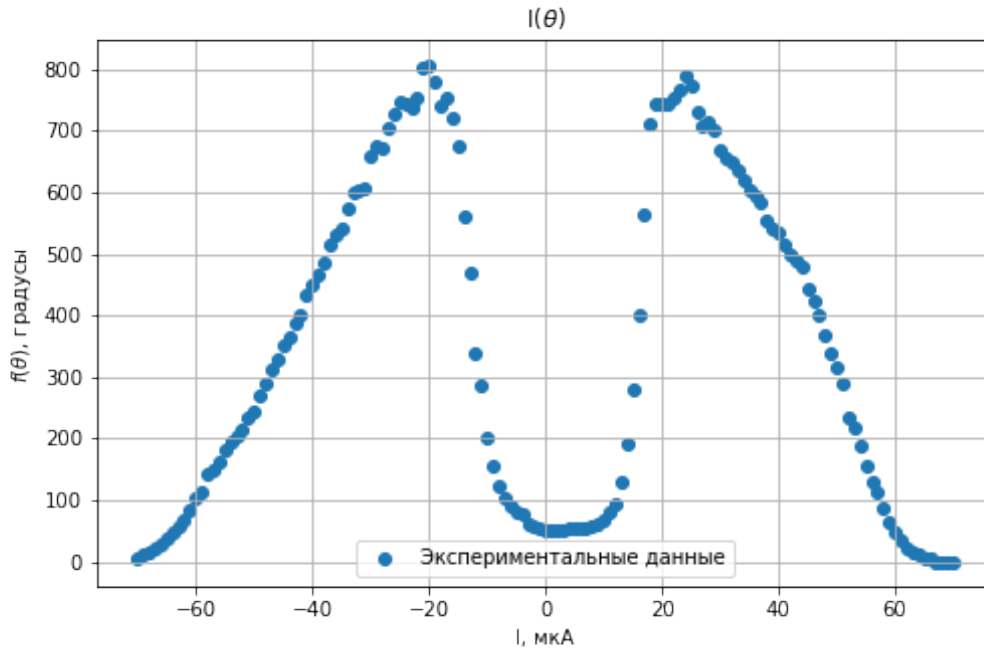


Рис. 7. График с полученными данными.

Как можно заметить, при угле $\theta \approx 3^\circ$ ток достигает локального минимума. Ширина провала $\delta\theta \approx 29^\circ$. Перепишем закон Брэгга-Снелла 1 для $\theta = 0^\circ$ и $\theta_{min} = 3^\circ$. Полученные выражения поделим друг на друга и получим:

$$\frac{n}{\sqrt{n^2 - \sin^2 \theta_{min}}} = \frac{\lambda}{\lambda_{min}}$$

Длина волны минимума пропускания:

$$\lambda_{min} \approx 653 \text{ нм}$$

Считая что спектральная ширина минимума пропускания не зависит от угла падения, можно оценить разброс коэффициента преломления: Тогда можно выразить разницу показателей преломления:

$$\Delta n = \frac{n\pi}{2} \frac{\Delta\lambda}{\lambda} \approx 0.14$$

Вывод и дополнение

Были исследованы свойства твёрдых фотонных кристаллов. Экспериментальная зависимость угла падения от угла дифракции для минимальной длины волны пропускания достаточно близко совпадает с теоретической. Были найдены параметры фотонного кристалла, исследуемого в данном эксперименте: $D \approx 220.5 \text{ нм}$, $n \approx 1.55$. Также найдены параметры стоп-зоны образца: $\Delta n \approx 0.14$, $\lambda_{min} \approx 653 \text{ нм}$.

Также, во время предыдущих работ, удалось воспользоваться спектрометром и получить следующие данные для этого фотонного кристалла:

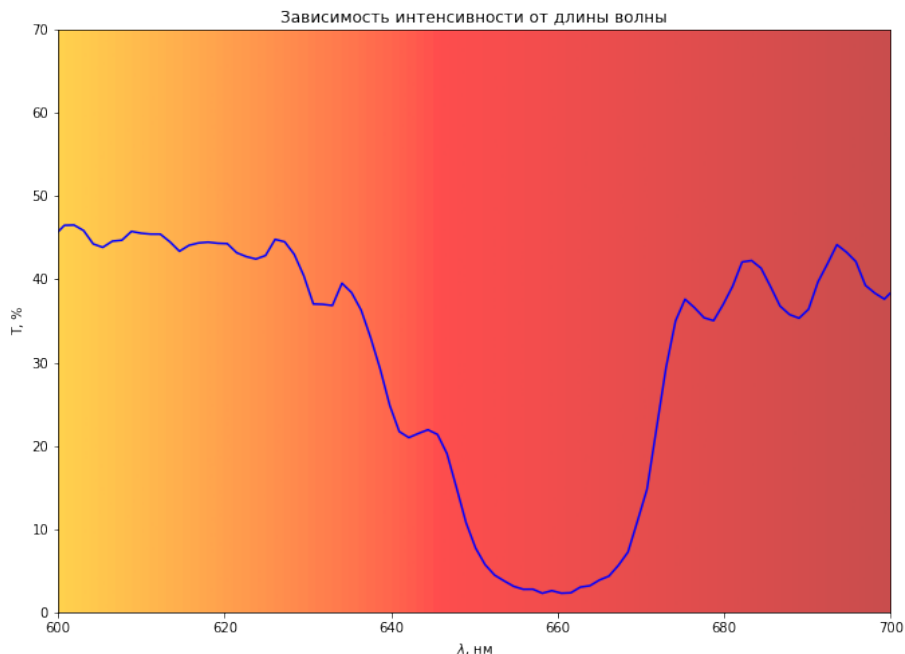


Рис. 8. Дополнение.

Как можно заметить, полученные в этой работе параметры стоп-зоны в целом сходятся с тем, что получено на спектрометре, различия могут быть вызваны в том числе и плохим состоянием образца и его некоторой неоднородностью.

Таким образом, можно сказать, что в целом теория и эксперимент сходятся. Некоторые различия можно объяснить тем, что в вычислениях прибегали к приближениям (линериализация) и тем, что образец был последний целый (из нескольких имевшихся), однако имел несколько трещин, которые, скорее всего, внесли вклад в результат.

Список литературы

- [1] Фотонные кристаллы. Методички к практикуму по оптике, 2021.