

НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ "ВЫСШАЯ ШКОЛА ЭКОНОМИКИ"

ФАКУЛЬТЕТ ФИЗИКИ

**ОТЧЁТ ПО ЛАБОРАТОРНОЙ РАБОТЕ**  
**"ФОТОННЫЕ КРИСТАЛЛЫ"**  
по курсу "Оптика"

Выполнила:

Фазлиахметова Олеся Камилевна

БФ3193

2 курс

Проверила:

Готовко С. К.

Москва  
24 мая 2021 г.

# Содержание

<b>1. Цель работы</b>	<b>2</b>
<b>2. Оборудование</b>	<b>2</b>
<b>3. Теоретическая справка</b>	<b>2</b>
3.1. Фотонные кристаллы . . . . .	2
3.2. Закон Брэгга-Снелла . . . . .	4
<b>4. Выполнение работы</b>	<b>5</b>
4.1. Часть 1 . . . . .	5
4.1.1. Ход работы . . . . .	5
4.1.2. Стоп-зона при $\theta = 0$ . . . . .	5
4.1.3. График зависимости угла поворота образца от угла дифракции $\theta(\varphi)$ . . . . .	6
4.1.4. Средний показатель $n$ и $D$ . . . . .	6
4.2. Часть 2 . . . . .	7
4.2.1. Ход работы . . . . .	7
4.2.2. График зависимости интенсивности прошедшего лазерного излучения от угла $I(\theta)$ . . . . .	8
4.2.3. Нормальная длина волны минимума пропускания $\lambda^{(n)}$ . . . . .	9
<b>5. Вывод</b>	<b>9</b>

## 1. Цель работы

### Пункт 1: Определение минимума прохождения

- 1) Определите, на какой длине волны находится стоп-зона при  $\theta = 0$ .
- 2) Измерьте зависимость угла поворота образца  $\theta$  от угла дифракции  $\varphi$ .
- 3) Постройте линеаризованный график  $\theta(\varphi)$ .
- 4) Из графика определите средний показатель преломления кристалла  $n$  и период изменения показателя преломления  $D$ .

### Пункт 2: Зависимость интенсивности лазерного излучения от величины угла.

- 1) Измерьте зависимость интенсивности лазерного излучения  $I$  (в  $\mu A$ ), прошедшего через фотонный кристалл, от величины угла  $\theta$ .
- 2) Постройте график полученной зависимости.
- 3) Определите угол падения  $\theta_0$ , соответствующий минимуму пропускания на длине волны лазера.
- 4) Определите ширину провала  $\Delta\theta_0$  на графике зависимости  $I(\theta)$  на уровне половины его глубины.
- 5) Определите нормальную (при  $\theta = 0$  удовлетворяющую уравнению  $2Dn = m\lambda^{(n)}$ ) длину волны минимума пропускания  $\lambda^{(n)}$ .

## 2. Оборудование

- 1) Фотонный кристалл;
- 2) Дифракционная решетка;
- 3) Линза;
- 4) Лампа;
- 5) Выключатель;
- 6) Оптическая скамья с транспортирами;
- 7) Спектральное плечо.

## 3. Теоретическая справка

### 3.1. Фотонные кристаллы

Фотонные кристаллы являются материалами, показатель преломления которых периодически изменяется на масштабах, сравнимых с длиной волны света. В оптическом спектре фотонных кристаллов существуют узкие области длин волн, для которых распространение света подавляется. Эти необычные оптические свойства используются для создания разнообразных оптических элементов на основе фотонных кристаллов (оптических фильтров, отражателей). В данной работе вам предлагается изучить свойства фотонных кристаллов на примере пористы (содержащих воздушные каналы) пленок оксида

алюминия. Структура образцов, полученных с помощью электрохимического окисления (анодирования) алюминия, может быть представлена как система несвязанных цилиндрических каналов, расположенных перпендикулярно поверхности образца (Рис. 1).

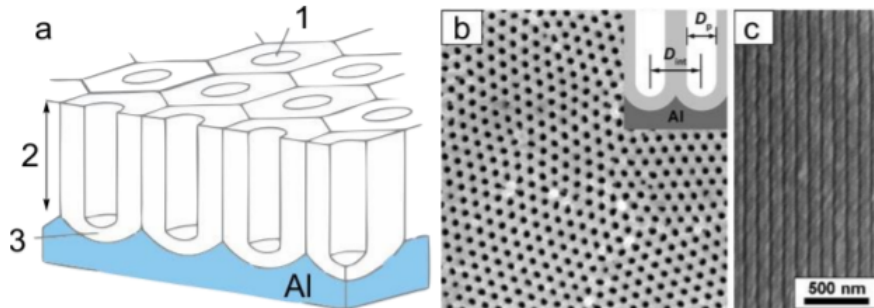


Рис. 1. (а) Схематическая структура пористой плёнки оксида алюминия: (1)-пора, (2)- пористый слой, (3)-барьерный слой. Изображение плёнки, полученное с помощью электронного микроскопа: (b) вид сверху, (c) поперечное сечение

Диаметр пор и расстояние между ними зависят от условий электрохимической обработки, позволяющей получать структуры с переменной пористостью перпендикулярно поверхности оксидной пленки, благодаря изменению напряжения во время анодирования (Рис. 2).

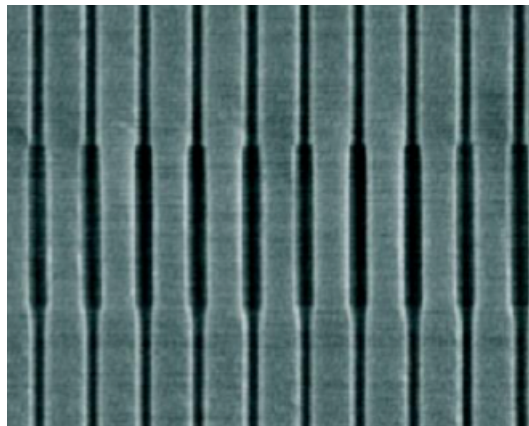


Рис. 2. Изображение поперечного разреза анодного оксида алюминия, полученное с помощью электронного микроскопа [Nat.Mater., 2006, 5, 741]

Изменение пористости оксидной пленки приводит к изменению её показателя преломления. Заметим, что показатель преломления исследуемых образцов периодически изменяется только в одном направлении: перпендикулярно поверхности пленки. Поэтому изучаемые образцы являются *одномерными фотонными кристаллами*. Следует отметить, что тонкие плёнки анодного оксида алюминия с постоянным диаметром оптически прозрачны, тогда как фотонные кристаллы окрашены благодаря явлению интерференции света в их слоистой структуре.

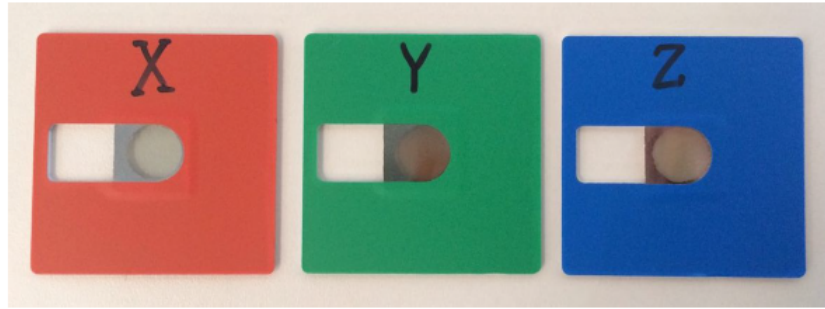


Рис. 3. Образцы фотонных кристаллов.

### 3.2. Закон Брэгга-Снелла

Образцы фотонных кристаллов, исследуемые в данной задаче, состоят из слоёв с разными показателями преломления  $n_i$ . Показатель преломления периодически изменяется вдоль оси  $z$  с периодом  $D$  и не зависит от длины волны  $\lambda$ . Обозначим средний показатель преломления  $n$ , а изменение показателя преломления  $\Delta n = n_{\max} - n_{\min}$  (в нашей работе  $\Delta n \ll n$ ).

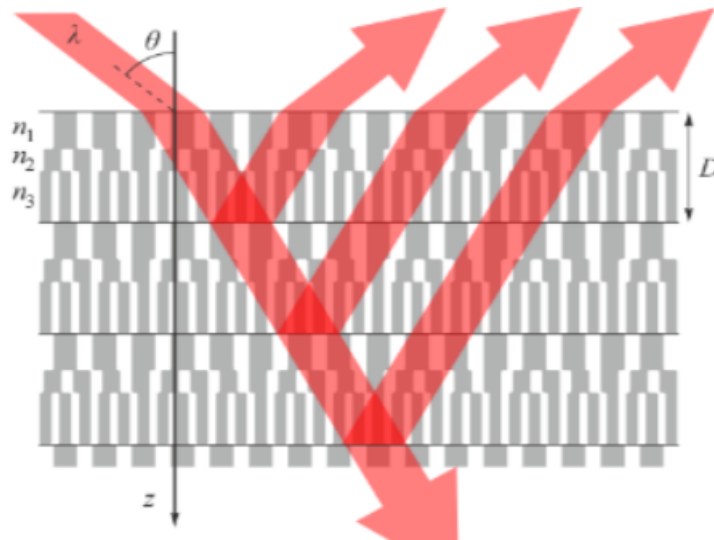


Рис. 4. Структура фотонного кристалла

Рассмотрим параллельный монохроматический пучок с постоянной интенсивностью и длиной волны  $\lambda$ , 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  $\theta$  (минимумы пропускания наблюдаются при тех же углах), которые определяются условием:

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

Где  $m=1, 2, \dots$  целые числа, означающие порядок интерференции.

Выражение (1) называется законом Брэгга-Снелла. Минимумы пропускания наблюдаются при тех же углах  $\theta$ . Если угол остается постоянным, а длина волны  $\lambda$  изменяется, закон Брэгга-Снелла можно использовать, как уравнение для нахождения  $\lambda$ .

С помощью угла дифракции можем выразить длину волны, которая соответствует минимуму пропускания:

$$h \sin \varphi = m\lambda \quad (2)$$

где  $h = 1000$  нм – период дифракционной решетки. Для нашего эксперимента  $m = 1$ , объединяя (1) и (2), получим:

$$2D\sqrt{n^2 - \sin^2 \theta} = h \sin \varphi \quad (3)$$

Длины волн, удовлетворяющие закону Брегга-Снелла, будем называть длинами волн минимумов пропускания. Длины волн минимумов пропускания при  $\theta = 0$  нормальными длинами волн минимумов пропускания для данного фотонного кристалла.

## 4. Выполнение работы

### 4.1. Часть 1

#### 4.1.1. Ход работы

- 1) Собрать экспериментальную установку.
- 2) Лампу поместить так, чтобы стоп-зону было хорошо видно, то есть поместить лампу на фокусном расстоянии.
- 3) Включить лампу, с помощью вращения дифракционного плеча найти первый дифракционный максимум.
- 4) При повороте фотонного кристалла, изменения угла падения можно увидеть, как по спектру движется темная полоска – минимум прохождения.
- 5) Изменяя угол падения и угол отражения, таким образом, чтобы середина стоп-зоны совпадала с черной отметкой дифракционной решётки, снять данные для рассматриваемого фотонного кристалла.
- 6) Проанализировать, полученные данные.

#### 4.1.2. Стоп-зона при $\theta = 0$

Кристалл X:

$$\varphi = 45 \pm 0.5^\circ \quad (4)$$

Кристалл Y:

$$\varphi = 29.2 \pm 0.5^\circ \quad (5)$$

#### 4.1.3. График зависимости угла поворота образца от угла дифракции $\theta(\varphi)$

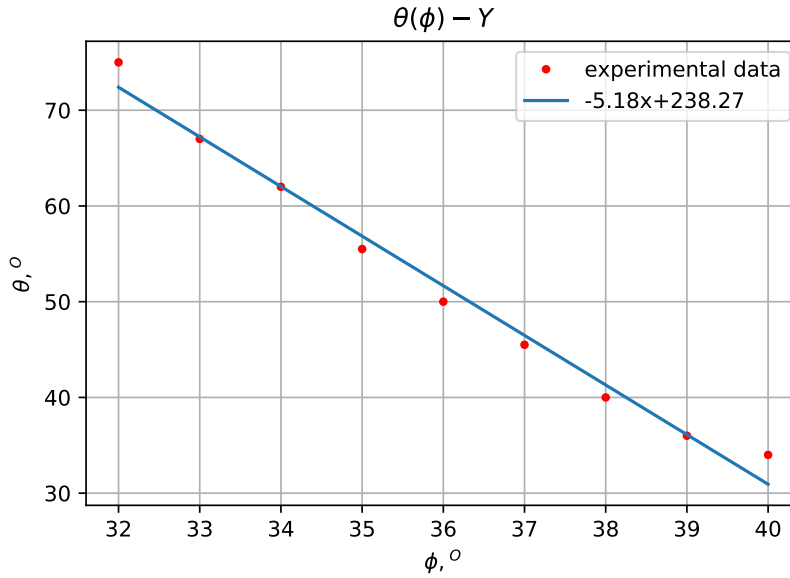


Рис. 5. График линейной зависимости угла поворота образца от угла дифракции для Y

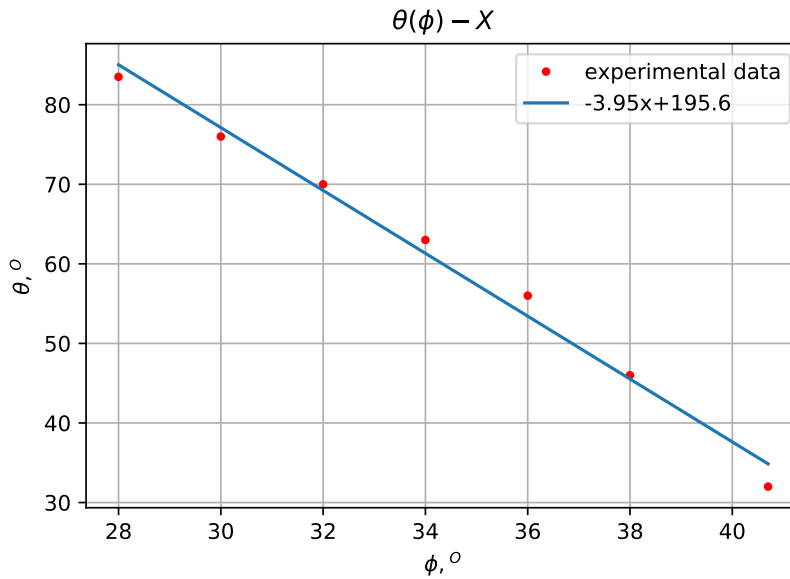


Рис. 6. График линейной зависимости угла поворота образца от угла дифракции для X

#### 4.1.4. Средний показатель $n$ и $D$ .

Из (3) следует:

$$\sqrt{n^2 - \left(\frac{h \sin \varphi}{2D}\right)^2} = \sin \theta \quad (6)$$

Построим графики зависимости  $\sin \theta(\sin \varphi)$  – для нахождения коэффициентов  $n$  и  $D$ . Подгонка функцией (6) при помощи `scipy` дает следующие результаты:

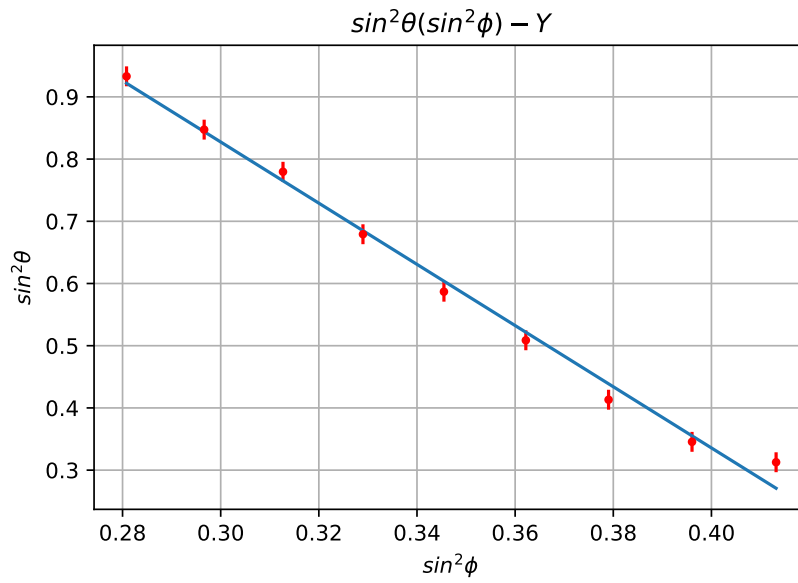


Рис. 7. График зависимости угла поворота образца от угла дифракции для Y

$$n = 1.5 \pm 0.01 \quad D = 225.5 \pm 2.2 \text{ нм} \quad (7)$$

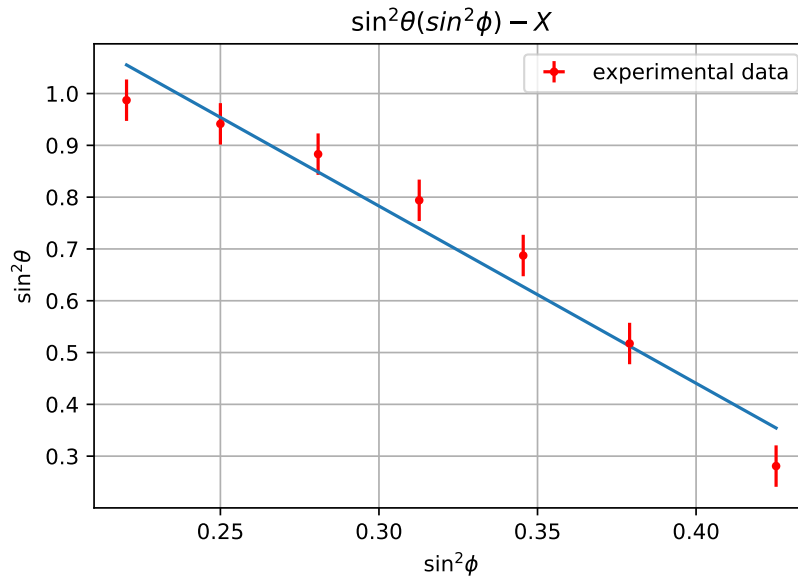


Рис. 8. График зависимости угла поворота образца от угла дифракции для X

$$n = 1.34 \pm 0.04 \quad D = 270 \pm 16 \text{ нм} \quad (8)$$

## 4.2. Часть 2

### 4.2.1. Ход работы

- 1) Собрать установку с лазером ( $\lambda_0=660\text{нм}$ ).



- 2) Повращать фотонный кристалл и заметить, что при изменении угла падения меняется значение тока, протекающего через мультиметр (интенсивности прошедшего света).
- 3) Поворачивая образец на разные значения  $\theta$  снять данные тока с мультиметра.
- 4) Проанализировать полученные данные.

#### 4.2.2. График зависимости интенсивности прошедшего лазерного излучения от угла $I(\theta)$

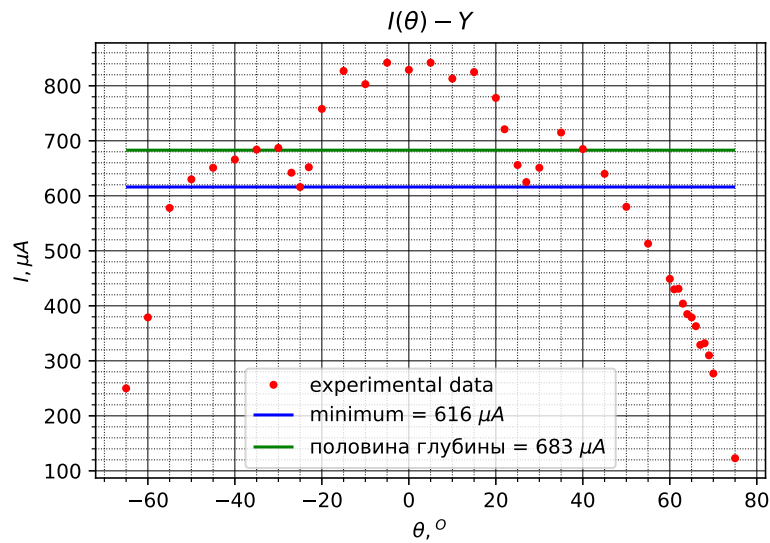


Рис. 9. График зависимости интенсивности прошедшего лазерного излучения от угла для Y

Значение минимума достигается при  $\theta_0 = 25 \pm 0.5^\circ$

Ширина провала:  $19 \pm 5^\circ$

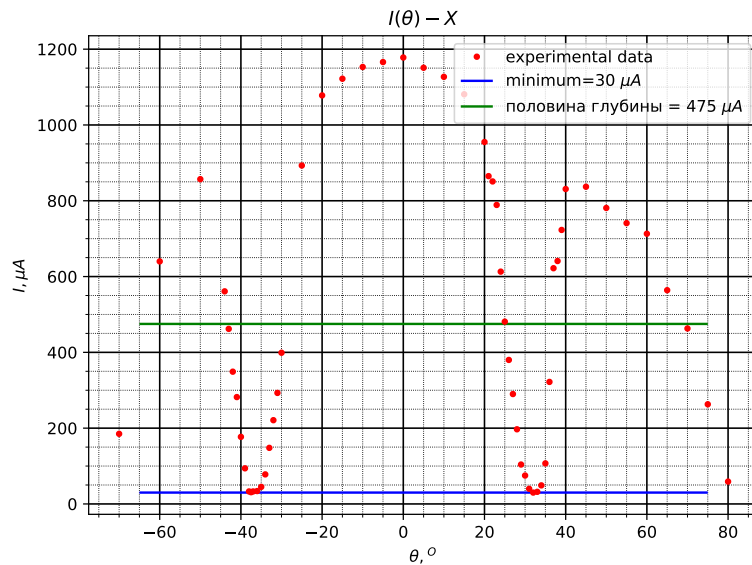


Рис. 10. График зависимости интенсивности прошедшего лазерного излучения от угла для X

Значение минимума достигается при  $\theta_0 = 32 \pm 0.5^\circ$

Ширина провала:  $18 \pm 5^\circ$

#### 4.2.3. Нормальная длина волны минимума пропускания $\lambda^{(n)}$

Определим нормальную длину волны минимума пропускания:

$$\frac{n}{\sqrt{n^2 - \sin^2 \theta_0}} = \frac{\lambda^{(n)}}{\lambda_0} \quad (9)$$

Для образца Y:

$$\lambda^{(n)} = \frac{n\lambda_0}{\sqrt{n^2 - \sin^2 \theta_0}} = 687 \pm 1.5 \text{ нм} \quad (10)$$

Для образца X:

$$\lambda^{(n)} = \frac{n\lambda_0}{\sqrt{n^2 - \sin^2 \theta_0}} = 714.8 \pm 1.8 \text{ нм} \quad (11)$$

Оценим разницу показателей преломления:

$$\frac{\Delta\lambda}{\lambda} = \frac{2\Delta n}{\pi n} \quad (12)$$

$$\Delta n = \frac{\pi n \Delta\lambda}{2\lambda} \quad (13)$$

Для образца Y:

$$\Delta n = 0.09 \pm 0.01 \quad (14)$$

Для образца X:

$$\Delta n = 0.18 \pm 0.01 \quad (15)$$

## 5. Вывод

В ходе работы мы

### Пункт 1: Определение минимума прохождения

- 1) Определили, на какой длине волны находится стоп-зона при  $\theta = 0$ .
- 2) Измерили зависимость угла поворота образца  $\theta$  от угла дифракции  $\varphi$ .
- 3) Построили линеаризованный график  $\theta(\varphi)$ .
- 4) Определили средний показатель преломления кристалла  $n$  и период изменения показателя преломления  $D$ .

### Пункт 2: Зависимость интенсивности лазерного излучения от величины угла.

- 1) Измерили зависимость интенсивности лазерного излучения  $I$  (в  $\mu A$ ), прошедшего через фотонный кристалл, от величины угла  $\theta$ .
- 2) Построили график полученной зависимости.

- 3) Определили угол падения  $\theta_0$ , соответствующий минимуму пропускания на длине волны лазера.
- 4) Определили ширину провала  $\Delta\theta_0$  на графике зависимости  $I(\theta)$  на уровне половины его глубины.
- 5) Определили нормальную (при  $\theta = 0$  удовлетворяющую уравнению  $2Dn = m\lambda^{(n)}$ ) длину волны минимума пропускания  $\lambda^{(n)}$ .